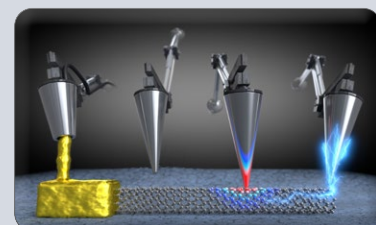




مقایسات بین آزمایشگاهی، آزمون مهارت، چرا و چگونه؟



روش آزمون غربالگری با بالا چیست؟ (بخش اول: معرفی، ساز و کار، کاربرد)



استفاده از میکروسکوپ پروبی روبشی در ساخت ترانزیستورهای تک الکترونی



ارزیابی عملکرد دستگاه اسپکتروفتومتر در اندازه‌گیری میزان نیتریت و نیترات در میوه‌ها و سبزیجات به طریق پیناب‌سنجی مولکولی



مقایسه کیفیت روش‌های آرایه فازی و تمرکز کامل، در ارزیابی عیوب داخلی قطعات فلزی

مروری بر روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس مایعات

مجال برای ارتقای دانش و تخصص مدیران و کارشناسان آزمایشگاه‌ها

در سال ۱۳۹۹ ده عنوان استاندارد ملی به همت اعضای شبکه آزمایشگاهی تدوین شد

نویسندگان

سید فرشید چینی^{۱*}، مجید شاکر^۲
وحدت زاهدی اصل^۳
علی اصغر صادقی قزوینی^۴

*chini@ut.ac.ir

مروری بر روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس مایعات



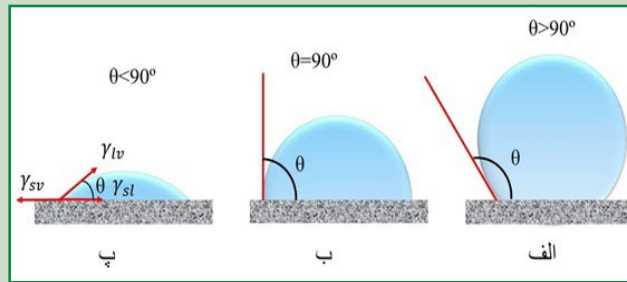
واژه‌های کلیدی

زاویه تماس، قطره بی‌پایه، آب، مایع، انرژی سطح.

چکیده

زاویه تماس بهترین معیار برای سنجش ترشوندگی و اندازه‌گیری انرژی سطح است. اندازه‌گیری دقیق زاویه تماس به تولید کنندگان محصولات پوششی از جمله رنگ‌ها، اجازه می‌دهد تا رنگ‌هایی با تنوع ترشوندگی، چسبندگی و دوام تهیه کنند. تاکنون روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری زاویه تماس ارائه شده‌است، که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارد. با توجه به شرایط مواد آزمایش شونده و انتظارات پژوهش‌گر از پاسخ آزمایش، روشی مناسبی باید انتخاب شود تا نتیجه مطلوب با قابلیت تکرارپذیری و قابل قیاس با سایر تحقیقات حاصل شود. در مقاله حاضر، روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس و پیشرفت‌های تازه در روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس مورد بررسی قرار گرفته است. تمام روش‌های ذکر شده از لحاظ ابعاد اندازه‌گیری، وجه مشترکی دارند که زاویه تماس ماکرو را ارائه می‌دهد. مطالب ارائه شده در این مقاله به محققان کمک می‌کند تا با دانش کافی در مورد روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس، بهترین روش را برای ارائه نتایج قابل قبول و مطمئن انتخاب کنند.

ترشوندگی نقش بسیار مهمی را در فرایندهای صنعتی، از جمله: صنایع رنگ [۱]، نفت و روانسازها [۲]، خوردگی و اکسیداسیون [۳]، پوشش‌های سرامیکی [۴]، صنعت چاپ [۵] و اسپری‌های خنک کننده [۶] ایفا کرده است. به‌ویژه، در سال‌های اخیر، اهمیت بررسی ترشوندگی در حوزه مواد فوق آب‌گریز [۷ و ۸]، خود تمیز شونده [۷ و ۸]، نانوسیالات [۹] و الکتروترشوندگی [۱۰ و ۱۱]، توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است. در مطالعات ترشوندگی، زاویه تماس به‌عنوان عامل مهم، اندازه‌گیری می‌شود. زاویه تماس درجه ترشوندگی را به‌هنگام برهم‌کنش جامد و مایع نشان می‌دهد. در مواردی که زوایای تماس کوچک باشد (کمتر از 90°) در شکل (۱-پ)، ترشوندگی زیاد است و در صورتی که زوایای تماس بزرگ (بیشتر از 90°) باشد مانند شکل (۱-الف)، ترشوندگی کم است.



شکل (۱): نمایی از زوایای تماس و مؤلفه‌های معادله یانگ در نقطه تماس سه فاز روی سطح جامد یکنواخت همگن [۱۲].

○ زاویه تماس

قابل اندازه‌گیری است که ممکن است با زاویه تماس ایده‌آل بسیار متفاوت باشد.

در سطوح غیر ایده‌آل هر زاویه تماس ظاهری یک حالت شبه پایدار است و یک سد انرژی بین هر حالت شبه پایدار و حالت شبه پایدار بعدی وجود دارد. مقادیر زوایای تماس ظاهری بین دو مقدار متغیر است. به بزرگترین زاویه شبه پایدار، زاویه تماس پیشروی و به کمترین مقدار از بین زوایای شبه پایدار، زاویه تماس پسروی گفته می‌شود. در شکل (۲) تغییرات انرژی آزاد سطح برای یک سطح صاف با ناهمگنی‌های یک در میان با زاویه تماس یانگ 30° و 40° درجه نشان داده شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید بیشینه مقدار زاویه تماس روی این سطح (بزرگترین دره انرژی) در 40° درجه اتفاق می‌افتد و کمترین دره انرژی در 30° درجه است. در بین 30° و 40° درجه دره‌های زیادی وجود دارند و هر کدام از آنها می‌توانند یک زاویه تماس ظاهری باشند. با عبور از تمام سدهای انرژی می‌توان به حداقل انرژی رسید که در این حالت به خصوص، حدود 35° درجه است. این انرژی می‌تواند با ارتعاش ملایم سطح تامین شود. در حالتی که سطح همگن و ناصاف باشد این حداقل انرژی در زاویه ونزل اتفاق می‌افتد و در حالتی که سطح صاف و ناهمگن باشد، حداقل انرژی در زاویه کسی-بکستر اتفاق می‌افتد. در صورتی که این ناهمگنی‌ها و یا زبری‌ها بسیار کوچک باشند (کمتر از 100 نانومتر)، این دره‌های انرژی، دیگر وجود ندارند و زوایای تماس ظاهری با زاویه تماس تعادلی (زاویه تماس در کمترین انرژی) برابر است و این زاویه برای سطوح زبر و همگن از رابطه ونزل^۶ و برای سطوح صاف و ناهمگن از رابطه کسی-بکستر^۷ حاصل می‌شود.

اندازه‌گیری این عامل، ابزاری به نسبت ساده و مفید برای ارزیابی انرژی سطح جامدات است [۱۳]، و چگونگی رفتار ترشوندگی جامد را توضیح می‌دهد. به عبارت دیگر، زاویه تماس معیاری از برهم‌کنش میان جامد و مایع است که توجیه کننده بسیاری از پدیده‌هایی است که در فصل مشترک جامد-مایع رخ می‌دهد. اگر سطح جامد ایده‌آل (صلب، صاف، هموار، از نظر شیمیایی همگن، نفوذناپذیر و واکنش‌ناپذیر) باشد، اندازه‌گیری زاویه تماس و تفسیر آن ساده است. در این حالت، زاویه تماس اندازه‌گیری شده با زاویه تماس ایده‌آل ترمودینامیکی مطابقت خواهد داشت. در شرایط ایده‌آل و در حالت تعادل مطابق شکل (۱) در نقطه ۳ فاز، برابری نیروهای کشش سطح در راستای افقی صفر است (زیرا در حالت تعادل خط ۳ فاز به جا نمی‌شود). این تعادل منجر به رابطه زیر می‌شود که با رابطه یانگ^۵ شناخته می‌شود:

$$\gamma_{lv} \cos \theta_y + \gamma_{sl} = \gamma_{sv} \quad \text{معادله (۱)}$$

در این معادله: γ_{sv} و γ_{sl} کشش سطحی مایع-بخار، جامد-مایع، و جامد-بخار هستند و θ_y زاویه تماس تعادلی یا زاویه تماس یانگ است. با این حال، در واقعیت، بیشتر سطوح تا حدی زبر و ناهمگن هستند. در چنین شرایطی، تنها مقدار زاویه تماس ظاهری (θ_{ap})

تماس را افزایش و یا کاهش دهد. اگر زاویه تماس یانگ کمتر از ۹۰ درجه باشد، زبر کردن باعث کاهش زاویه تماس ظاهری می‌شود و اگر زاویه تماس یانگ بیش از ۹۰ درجه باشد زبر کردن سطح باعث افزایش زاویه تماس می‌شود. ولی برای حالت کسی-بکستر و در حالتی که فاز دوم هوا باشد، زبر کردن همیشه باعث افزایش زاویه تماس می‌شود.

هنگام اندازه‌گیری، زاویه تماس ظاهری اندازه‌گیری می‌شود که لزوماً تکرارپذیر نیست ولی اگر زوایای تماس پیشروی و پسروی اندازه‌گیری شود، این زوایا تکرارپذیر خواهند بود. در ضمن، به تفاضل زوایای تماس پیشروی و پسروی، زاویه تماس پسماند گفته می‌شود. زاویه تماس پسماند معیاری برای نشان دادن نیروی چسبندگی قطره به سطح است و نیروی چسبندگی قطره به سطح با زاویه تماس پسماند متناسب است [۱۶]. به زوایای تماس پیشروی و پسروی به علت ماهیت روش‌های اندازه‌گیری آنها زوایای تماس دینامیک گفته می‌شود.

روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس به دو دسته اندازه‌گیری اپتیکی (مستقیم) [۱۷] و نیرویی (غیرمستقیم) [۱۸] تقسیم‌بندی می‌شوند. در ادامه به بررسی روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس و در نهایت، مزایا و معایب هر کدام می‌پردازیم. اگرچه انجام بعضی از این روش‌ها کار ساده‌ای نیست و پیچیدگی‌های خاص خود را دارد [۱۹ و ۲۰].

● روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس استاتیکی:

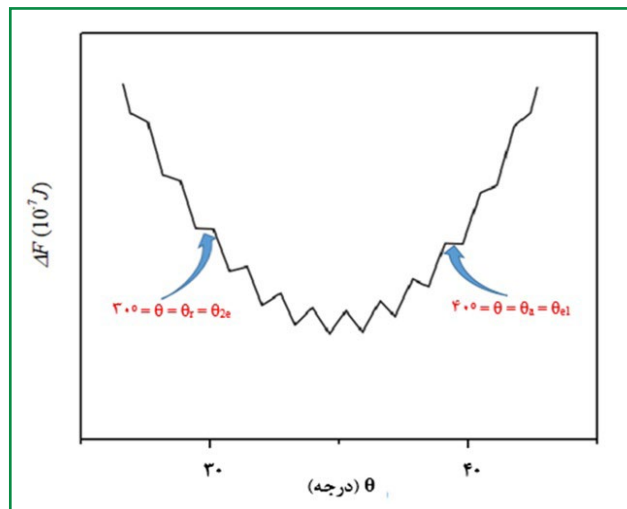
● بالا آمدن مویین روی صفحه عمودی

وقتی یک مایع در تماس با یک صفحه عمودی و عرض بی‌نهایت قرار می‌گیرد، مایع در اثر پدیده مویینگی بالا می‌آید. ارتفاع بالا آمدن مایع، h ، به کمک انتگرال‌گیری از معادله لاپلاس محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$\sin \theta = 1 - \frac{\Delta \rho g h^2}{2\gamma_{lv}} \quad \text{معادله (۵)}$$

در این معادله: $(\Delta \rho)$ اختلاف چگالی بین مایع و بخار و (θ) شتاب جاذبه است.

صفحاتی با عرض بیش از ۲ cm شرط بی‌نهایت بودن را برآورده می‌کنند. چینی‌شی شبیه دستگاه ترازوی ویلهلمی^۸ با اندکی اصلاحات می‌تواند برای اندازه‌گیری ارتفاع بالا آمدن مویین (h) و در نهایت، تعیین مقدار زاویه تماس مورد استفاده قرار گیرد [۲۲ و ۲۳]. همچنین، زوایای تماس دینامیک را می‌توان با بالا و پایین بردن صفحه به‌دست آورد. این روش توسط بودزیاک^۹ و نثومن^{۱۰}، کوک^{۱۱} و همکاران، مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۴ و ۲۵]. برای سطوح صاف و به نسبت همگن خط تماس مایع و سطح به نسبت صاف است و دقت ۰/۱ درجه قابل دسترسی است. همچنین از این روش و با دانستن زاویه تماس می‌توان کشش سطحی مایع را نیز اندازه‌گیری کرد [۲۶ تا ۲۸].



شکل (۲): تغییرات انرژی آزاد سطح صاف و نا همگن، به طوری که ناهمگنی‌ها یک در میان و زاویه تماس یانگ هر ناهمگنی ۳۰ و بعدی ۴۰ درجه است [۱۴].

رابطه ونزل برای حالتی است که سطح همگن و زبر است، از نظر عملی زبری‌ها آنقدر کوچک است که فقط یک حالت تعادلی وجود دارد و آن هم حداقل انرژی است و قطره به داخل زبری‌ها نفوذ کند [۱۵]:

$$\cos \theta_W = r \cos \theta_y \quad \text{معادله (۲)}$$

در این معادله: (θ_W) زاویه تماس ونزل و (r) زبری سطح (نسبت سطح واقعی به سطح تصویر شده) است.

رابطه کسی-بکستر برای سطح صاف و ناهمگن است به این صورت که زاویه تماس ظاهری برابر میانگین وزنی ناهمگنی‌ها است:

$$\cos \theta_{CB} = a_1 \cos \theta_{y1} + a_2 \cos \theta_{y2} \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن: (θ_{CB}) زاویه تماس کسی-بکستر، (a_1) و (a_2) نسبت سطحی نوع ۱ و نوع ۲ و (θ_{y1}) و (θ_{y2}) زاویه تماس یانگ روی سطح نوع ۱ و نوع ۲ است.

در حالتی که یکی از ۲ ناهمگنی هوا باشد و قطره به داخل حفره‌های هوا نفوذ نکند رابطه کسی-بکستر به رابطه زیر تغییر می‌کند:

$$\cos \theta_{CB} = (1 + \phi) \cos \theta_y - 1 \quad \text{معادله (۴)}$$

که در آن: (ϕ) نسبت سطح جامد به کل سطح است. در این صورت هر چه سطح متخلخل‌تر باشد زاویه تماس بزرگتر خواهد بود. البته اگر زبری‌ها بزرگ باشند قطره به داخل آنها نفوذ می‌کند. بنابراین رابطه ونزل، اگر یک سطح همگن زبر شود، بسته به زاویه تماس یانگ آن سطح در حالت صاف، زبر کردن می‌تواند آن زاویه

● فیبر نازک

(r) و (h) در معادله (۶)، محاسبه می‌شود. اگر (r) بسیار کوچک باشد، زاویه تماس به کمک ارتفاعی که سیال در لوله موئین بالا می‌آید قابل محاسبه است. رابطه بین زاویه تماس، ارتفاع موئین و شعاع با نام قانون جورین شناخته می‌شود که پس از مطالعات جیمز جورین^{۱۶} روی این پدیده در سال ۱۷۱۸ میلادی، به نام او نام‌گذاری شد. برای لوله‌های بزرگ و شفاف، روش بازتاب لانگمویر-اسکفر نیز می‌تواند به کار گرفته شود تا زاویه تماس به صورت مستقیم اندازه‌گیری شود [۳۸].

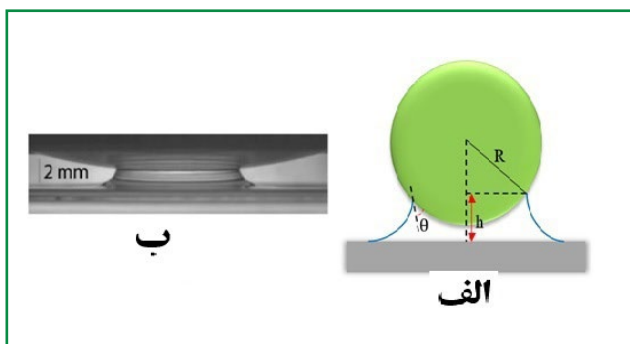
● پل موئین^{۱۷}

رستانگو^{۱۸} و همکارانش، یک روش با دقت بالا را مانند شکل (۴)-۴-ب) برای اندازه‌گیری زاویه تماس ابداع کردند که با نام پل موئین شناخته می‌شود [۳۹ و ۴۰]. در آزمایش آن‌ها، یک سطح جامد کروی (به‌طور معمول از کوارتز محذب معروف به شیشه ساعت) در تماس با یک حمام بزرگ از مایع قرار داده می‌شود. به دلیل اثر موئینگی، یک هلال یا پل موئین مطابق شکل (۴-الف) دور خط تماس تشکیل می‌شود که سطح خیس شده توسط مایع را مشخص می‌کند. شکل این پل موئین با به آرامی بالا و پایین رفتن جامد تغییر می‌کند تا یک سطح خیس شونده نظام‌مند را نشان دهد. در واقع، این روش برای تمام سطوح شفاف به شرطی که بتوان آنها را کروی درست کرد؛ قابل استفاده است. با نمایش دادن سطح خیس شده و مقدار حرکت سطح جامد، زوایای تماس دینامیک می‌تواند به‌طور کیفی از طریق محاسبات عددی معادله یانگ-لاپلاس^{۱۹} یا با یک رابطه تقریبی ساده تعیین شود:

$$A = 2\pi R \left(k^{-1} \sqrt{2(1 + \cos \theta)} - h \right) \quad \text{معادله (۷)}$$

که در آن: (A) سطح تر شده، (k^{-1}) طول موئین، و (h) فاصله سطح جامد از سطح حمام مایع است. طول موئین از معادله (۸) به‌دست می‌آید [۴۱]:

$$k^{-1} = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \quad \text{معادله (۸)}$$

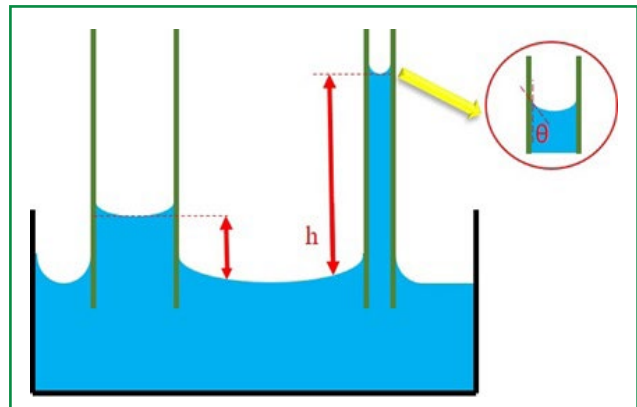


شکل (۴): (الف): نمایشی از پل موئین و (ب): تصویر پل موئین [۴۲].

شوارتز^{۱۲} و همکارانش برای اندازه‌گیری مستقیم زاویه تماس روی فیبرها تلاش کرده‌اند [۲۹ و ۳۰]. آنها یک تار را به‌صورت افقی در میدان یک میکروسکوپ قرار دادند و از یک عدسی زاویه‌سنج برای اندازه‌گیری زاویه تماس قطرات استفاده کردند. چرخش تار حول محور طولی‌اش منجر به اندازه‌گیری تقریبی زوایای تماس پیشروی و پسروی می‌شود. باسکم^{۱۳} و رومانس^{۱۴} این روش را با قرار دادن یک حلقه پلاتینی کوچک برای ثابت نگه داشتن قطره بهبود داده و یک فیبر شیشه را از مرکز قطره عبور دادند [۳۱]. روش^{۱۵} شکل قطرات روی فیبر را با قطرهای مختلف محاسبه کرده است [۳۲]. ولی باید دقت شود تا قطر قطره خیلی بزرگ‌تر از قطر فیبر نباشد، زیرا در این حالت زاویه تماس ظاهری می‌تواند همراه کننده باشد. در این روش، به دلیل ابعاد کوچک، عدم قطعیت‌های بزرگی ناشی از انحنا و وزن قطره که باعث انحراف در تشخیص محل دقیق تقاطع تار و مایع می‌شود، به وجود می‌آید. همچنین، می‌توان از هلال تعادلی نزدیک یک فیبر شناور روی مایع برای اندازه‌گیری زاویه تماس بهره‌مند شد [۳۳ تا ۳۵]. علاوه بر این، روش بازتاب که توسط فورت و پترسن توسعه یافته است، قابلیت اندازه‌گیری زاویه تماس روی فیبر را دارد [۳۶].

● لوله موئین

در این روش، زاویه تماس از طریق اندازه‌گیری مقدار بالا آمدن مایع در لوله موئین، مانند شکل (۳) و محاسبه به کمک معادله لاپلاس به‌دست می‌آید.



شکل (۳): نمایشی از روش لوله موئین [۳۷].

برای یک لوله موئین با سطح مقطع دایره‌ای، هلال به شکل یک مقطعی از کره در نظر گرفته می‌شود و بالا آمدن موئین، h ، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\Delta \rho g r} \quad \text{معادله (۶)}$$

در این معادله: شعاع لوله موئین (r)، اختلاف چگالی بین مایع و بخار ($\Delta \rho$) و شتاب جاذبه (g) است. زاویه تماس با قرار دادن مقادیر

عدسی سر دوربین انجام می‌شد. با گذر سال‌ها، اصلاحاتی روی این دستگاه انجام شد تا دقت و صحت این روش بهبود یابد. فیلیپس^{۲۳} و ریدفرد^{۲۴} و مک اینتیر^{۲۵} تصاویر قطرات را با یک مماس‌سنج بررسی کردند [۴۹ و ۵۰]. مماس‌سنج به این صورت بود که یک آینه به‌صورت عمود بر تصویر در نقطه سه فاز قطره قرار می‌گیرد و زاویه آینه جوری تنظیم می‌شود که منحنی شکل قطره، با بازتاب تصویرش روی آینه، یک منحنی هموار و پیوسته تشکیل دهد. زاویه آینه با خط تماس قطره برابر با زاویه تماس است. البته این روش به دلیل به‌کارگیری زاویه‌سنج از دقت بالایی برخوردار نبود [۵۱]. فیشر^{۲۶} با کمک جرم قطره و شعاع سطح تماس برای تعدادی قطره با زوایای تماس کمتر از ۳۰ درجه و قرار دادن این اطلاعات در یک معادله نیمه تجربی توانست مقدار زاویه تماس را محاسبه کند [۵۲]. سپس الگوریتم‌های ادسا، دایره، چند جمله‌ای براساس پردازش تصویر دیجیتال توسعه داده شده‌اند که هر کدام مزایا و معایب خود را دارند [۵۳]. امروزه می‌توان با کمک یک دوربین دیجیتال از قطره عکس گرفت و سپس به راحتی زاویه تماس را محاسبه کرد [۵۴]. استفاده از بزرگنمایی زیاد ما را قادر می‌سازد تا با دقت بیشتری به بررسی جزئیات پردازیم [۵۵].

○ الگوریتم چند جمله‌ای

این روش برای محاسبه زاویه تماس از تصویر قطره به ویژگی‌های فیزیکی مایع یا فرضیات مربوط به شکل قطره نیازی ندارد. در این روش ابتدا مجموعه داده‌های تصویر به مجموعه‌ای از مختصات پیکسل تبدیل و سپس یک چند جمله‌ای بر مرز قطره فیت می‌شود. درجه چند جمله‌ای و تعداد پیکسل‌های لازم برای فیت شدن چند جمله‌ای باید تعیین شود. با استفاده از چند جمله‌ای و شیب آن در نقطه تماس، زاویه تماس به‌دست می‌آید. این روش برای قطره‌های متقارن و غیرمتقارن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

○ الگوریتم تقارن محوری قطره^{۲۷}

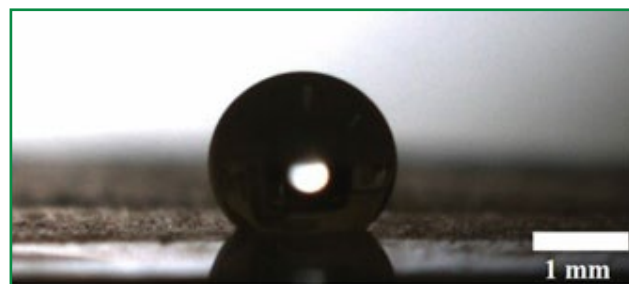
این روش علاوه بر اندازه‌گیری کشش سطح قطره آویزان، برای اندازه‌گیری زاویه تماس قطره چسبیده نیز استفاده می‌شود. شرط لازم برای استفاده از این روش، تقارن محوری قطره است. شکل یک قطره بدون وجود نیروی وزن کروی شکل است. با حضور جاذبه شکل قطره از حالت کروی در آمده و شکل قطره با حل یک معادله دیفرانسیلی لاپلاسین به‌دست می‌آید (یافتن بهترین پروفیل نظری که بر مرز قطره منطبق باشد). در صورتی که کشش سطح معلوم باشد، شکل تقریبی قطره به‌دست می‌آید. با قرار دادن منحنی نظری لاپلاس بر مرز قطره و بهینه‌سازی می‌توان منحنی شکل قطره و در نتیجه زاویه تماس را به‌دست آورد. روش ADSA، علاوه بر قطرات غیرمتقارن برای قطرات نسبتاً کروی نیز نتایج نادرستی می‌دهد. اولین نسل از روش ADSA توسط روتنبرگ توسعه یافت [۵۶] و دانشمندان دیگر به بهبود آن کمک کردند. دقت این روش در حدود ۰/۲ درجه است.

در این روش، یک تابع هدف به‌صورت مجموع مربعات فواصل عمودی (و یا افقی) بین نقاط قطره و نقاط متناظر پروفیل نظری

روش پل مویین چندین مزیت دارد. هر دو زاویه تماس پیشروی و پسروی با حرکت دادن سطح جامد به آرامی به بالا یا پایین قابل اندازه‌گیری هستند. به دلیل حساسیت بالای این روش، می‌توان از آن برای مطالعه سطوح با زاویه تماس پسماند کم (حدود ۱ درجه) استفاده کرد. همچنین، این روش توانایی زیادی برای تشخیص پوشش‌های با اصطکاک کم فراهم کرده است [۴۳]. اما این روش اشکالاتی نیز دارد؛ به‌عنوان مثال، تبخیر مایع آزمایش شونده باعث عدم قطعیت در تعیین فاصله سطح جامد از سطح حمام مایع شده که باعث انحراف در نتایج می‌شود [۴۰]. علاوه بر این، محدودیت شکل کروی و شفافیت پوشش و زیر لایه از دیگر محدودیت‌های این روش است [۴۴].

○ قطره چسبیده (بی پایه)

رایج‌ترین روش اندازه‌گیری زاویه تماس، اندازه‌گیری زاویه مماس در نقطه تماس سه فاز روی یک قطره چسبیده است. بیگلو^{۲۰} و همکاران یک وسیله آزمایشگاهی ساده برای اندازه‌گیری زاویه تماس مایعات مختلف روی سطوح پولیش شده ساختند و آن را زاویه‌سنج تلسکوپی نامیدند [۴۵]. بعدها اولین دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس توسط زیسمان^{۲۱}، طراحی شد و در شرکت رم هارت^{۲۲} در اوایل دهه ۶۰ میلادی ساخته شد.



شکل (۵): تصویر یک قطره چسبیده روی سطح [۴۶].

این دستگاه دارای یک نگه‌دارنده افقی است تا نمونه مایع و جامد را ثابت نگه دارد؛ یک سازوکار تزریق دارد تا یک قطره از مایع مانند شکل (۵) را روی سطح جامد بچکاند. در ابتدا زیسمان و همکارانش از یک سیم پلاتینی برای چکاندن قطرات مایع روی سطوح جامد بهره می‌بردند [۴۷]. بدین صورت که ابتدا یک سیم مناسب پلاتینی را روی چراغ بنزن تا زمانی که قرمز شود حرارت می‌دادند تا تمیز شود. سپس سیم درون مایع فرو برده شده و به آرامی به آن ضربه زده می‌شد تا در نوک سیم قطره‌ای آویزان تشکیل شود. قطره به آرامی به سطح جامد نزدیک شده تا از روی سیم به روی سطح جامد پخش شود و تشکیل یک قطره چسبیده دهد. در این روش، انرژی جنبشی افتادن قطره روی سطح منجر به پخش ناخواسته قطره و در نتیجه تغییر شکل قطره می‌شد که موجب تکرارناپذیر شدن این روش می‌شد [۴۸]. همچنین در ابتدا اندازه‌گیری به سادگی با مماس کردن یک خط در نقطه تماس سه فازی روی قطره و خواندن زاویه از روی زاویه‌سنج از طریق



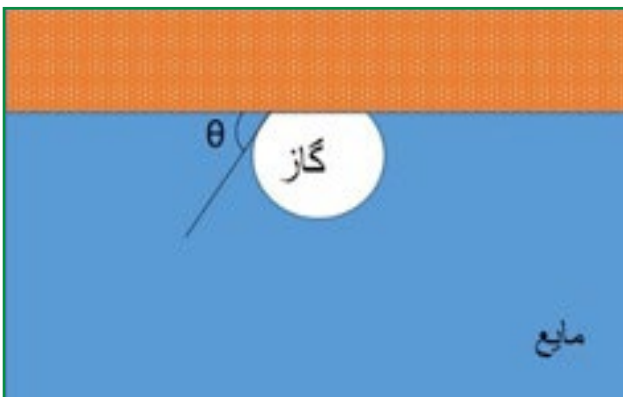
شکل (۶): دستگاه‌های اندازه‌گیری زاویه تماس، کشش سطح و انرژی سطح شرکت نانومهندسی سطح ژیکان (ساخت ایران) [۶۲].

یکی از محدودیت‌های روش قطره بی‌پایه، اندازه‌گیری زوایای کوچک (زیر ۲۰ درجه) است، چرا که نمی‌توان با قطعیت خط مماس را از خط تماس قطره با سطح تفکیک کرد. با در نظر گرفتن این مشکلات، روش قطره چسبیده به‌عنوان بهترین و راحت‌ترین روش به حساب می‌آید [۶۳]. البته این روش می‌تواند تا حدود ۲ درجه خطا داشته باشد [۶۳ و ۶۴].

برای کاهش خطا موارد زیر باید مدنظر قرار گیرند:

۱. از یک قطعه کوارتز (۵ × ۵ × ۵ سانتی‌متر مکعب) برای جداسازی قطره از محیط آن استفاده شد. مشخص شده‌است که علیرغم شکست نور، کوارتز باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری زاویه تماس نمی‌شود و می‌تواند اثرات جریان هوا در تغییر شکل قطره را از بین ببرد؛
۲. از میز مخصوص کاهش ارتعاشات استفاده شود؛
۳. از سیستم تزریق بدون ارتعاش استفاده شود؛
۴. نور محیط کنترل شده باشد زیرا تغییرات شدید و ناگهانی نور محیط می‌تواند باعث ایجاد خطا شود؛
۵. سطح اندازه‌گیری تمیز باشد و اثری از چربی دست و گرد و خاک روی آن نباشد؛
۶. دما، فشار و رطوبت محل انجام آزمون تا حدی کنترل شده باشد.

به‌منظور رفع محدودیت‌های روش قطره چسبیده برای زوایای تماس کمتر از ۲۰ درجه، به جای تشکیل یک قطره روی سطح جامد، می‌توان از یک حباب هوای گیر کرده در زیر نمونه جامد که در مایع فرو برده شده‌است، استفاده نمود (شکل (۷)).



شکل (۷): نمایی از حباب گیر کرده [۶۵].

تعریف می‌شود. عمل مطابق کردن با کوچک کردن تابع هدف انجام می‌پذیرد. این روش، از طریق استفاده از رایانه و خارج کردن خودکار پروفیل سطحی، توسط دانشمندان بهبود یافت (۵۷ و ۵۸). همچنین، روش‌های اصلاح اعوجاج اپتیکی و کاهش اغتشاشات محیطی در نرم‌افزار استفاده شدند تا دقت بهتری حاصل شود.

○ الگوریتم دایره

در این روش، یک دایره بر مرز قطره منطبق می‌شود و از شیب دایره در نقاط تماس زوایای تماس محاسبه می‌شود [۵۹]. در مدل بهینه شده این روش در نزدیکی خط تماس یک دایره به پروفایل قطره منطبق می‌شود. یعنی در مجموع ۲ دایره به ۲ سمت خط تماس قطره منطبق می‌شود. بعضی از دانشمندان استفاده از شکل بیضی برای محاسبه زاویه تماس را پیشنهاد کرده‌اند [۶۰].

○ الگوریتم مار^{۲۸}

برای تعیین زاویه تماس با کمک الگوریتم مار، کاربر نقاط تماس قطره با سطح جامد و تعدادی نقطه را روی مرز بین قطره و هوا مشخص می‌کند [۶۱]. سپس نرم‌افزار با الگوریتم مار زاویه تماس را محاسبه و اعلام می‌کند. اگرچه این روش برای قطرات با شکل نامتقارن، سطوح ناهمگن و قطراتی که شکلشان تحت تاثیر نیروی جاذبه تغییر شدیدی می‌کند، بسیار مناسب است، اما دقت آن به شدت به مهارت کاربر بستگی دارد؛ زیرا تعداد نقاط تعیین شده روی مرز بین قطره و هوا و همچنین تعیین نقاط سه گانه توسط کاربر انجام می‌شود و بر نتایج تاثیر می‌گذارد.

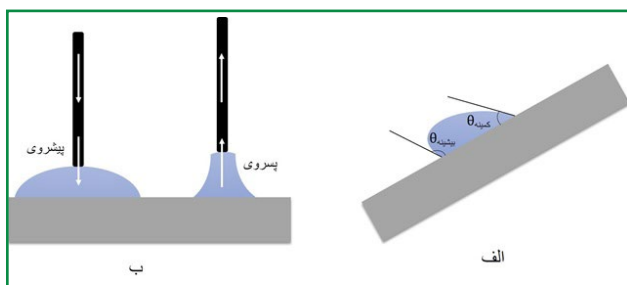
○ الگوریتم SPPF

بسته به ویژگی‌های سطح و جهت‌گیری نیروهای خارجی، قطره روی سطح ممکن است متقارن یا نامتقارن باشد. روش‌های قابل استفاده برای قطرات نامتقارن (به‌عنوان مثال، قطره روی سطوح شیب‌دار) ممکن است خیلی دقیق نبوده و برای اجرای خودکار رایانه مناسب نباشد. برای غلبه بر این مشکل، روش‌های مبتنی بر پردازش تصویر با دقت زیر پیکسل^{۲۹} ارائه شده‌است [۶۲]. روش اندازه‌گیری زاویه تماس به شرح زیر است:

۱. یافتن محل زیر-پیکسل مرز قطره؛
۲. تشخیص محل دقیق نقاط تماس به‌طور خودکار؛
۳. منطبق کردن چند جمله‌ای به مرز قطره در نزدیکی خط تماس؛
۴. محاسبه زاویه تماس.

خطای کمتر از ۱ درجه، زمان پردازش کوتاه، قابلیت استفاده برای همه دامنه‌های زاویه تماس، قابلیت کاربرد برای هر دو قطره متقارن و نامتقارن و کاملاً خودکار بودن از دیگر مزایای SPPF است. دستگاه‌های معدودی قابل اندازه‌گیری زاویه تماس با این الگوریتم هستند که یکی از آنها سری CAG شرکت ایرانی ژیکان^{۳۰} است (شکل (۶)).

به حالت عمودی چرخش می‌کند. در لحظه‌ای که قطره شروع به حرکت می‌کند، به زاویه صفحه زیرین با افق، زاویه لغزش گفته می‌شود. این روش توسط مک دوگال^{۳۲} و اکرن^{۳۳} معرفی شد [۶۷]. در ضمن در هنگام حرکت قطره، زاویه جلوی قطره مقداری نزدیک به زاویه پیشروی و زاویه عقب قطره مقداری نزدیک به زاویه پسروی را دارد. بنابراین، از این روش نیز برای اندازه‌گیری تقریبی زوایای دینامیک می‌توان استفاده کرد. البته زاویه پیشروی و پسروی در این روش اندکی متفاوت از زوایای پیشروی و پسروی در آزمایش قطره روی سطح افقی است [۶۸ و ۶۹]. زاویه پیشروی بزرگتر و زاویه پسروی کمتر است. بنابراین، زوایای جلو و عقب قطره در شروع حرکت در روش قطره روی سراسیبه را گاهی زوایای بیشینه و کمینه می‌نامند (شکل (۸-الف)).



شکل (۸): (الف): نمایشی از زوایای تماس بیشینه و کمینه به روش قطره روی سراسیبه [۷۰]. (ب): تصویر زوایای تماس پیشروی و پسروی به روش قطره روی سطح افقی [۷۱].

دلیل بزرگتر بودن زاویه تماس پیشروی در روش قطره روی سراسیبه این است که زمانی که زاویه تماس در لبه جلویی قطره به زاویه تماس پیشروی می‌رسد، نقاط اطراف لبه جلویی هنوز به زاویه پیشروی نرسیده‌اند و نمی‌توانند حرکت کنند، لذا قطره کماکان بی‌حرکت است. در لحظه حرکت زاویه تماس لبه جلویی اندکی بزرگتر از زاویه تماس پیشروی خواهد شد. در کل، در روش قطره روی سراسیبه، زوایای تماس بیشینه و کمینه و زاویه لغزش به‌دست می‌آیند و این زوایا همگی تابعی از وزن قطره هستند؛ بنابراین، روش قطره روی سراسیبه تکرارپذیر نیست و توصیه نمی‌شود.

● صفحه کج شونده

روش صفحه کج شونده توسط آدام^{۳۴} و جسونپ^{۳۵} توسعه یافت [۷۲]. در این روش، همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده‌است، یک صفحه جامد با یک سر ثابت نسبت به سطح مایع می‌چرخد، سر دیگر صفحه درون مایع است و در دو طرف صفحه انحنا تشکیل می‌شود. صفحه به آرامی کج می‌شود تا انحنا در یک طرف صفحه افقی شود. در هنگامی که انحنا در یک سمت افقی شد، زاویه بین صفحه و افق برابر با زاویه تماس است. به علت وجود آلودگی در مایع، خطای $\pm 5^\circ$ برای این روش گزارش شده‌است. تلاطم مایع به دلیل چرخش صفحه و نیاز به مهارت بالا از سختی‌های این

این روش توسط تاگارت^{۳۱} و همکارانش ابداع شده‌است که با عنوان روش حباب‌گیر کرده شناخته می‌شود [۶۶]. به‌طور معمول، مقدار کمی از هوا (حدود $10 \mu\text{l}$) به درون مایع مورد بررسی وارد می‌شود تا یک حباب زیر سطح جامد تشکیل دهد. در این روش، در فصل مشترک جامد-بخار شاهد آلودگی کمتری ناشی از قطرات روغن و سایر آلودگی‌هایی که در هوا وجود دارند خواهیم بود. همچنین، به دلیل وجود مقدار مایع بیشتری نسبت به روش قطره چسبیده قادر خواهیم بود تا دما را بسیار راحت‌تر ثبت و کنترل کنیم و این روش برای بررسی اثر دما بر زاویه تماس بسیار موثر است. به دلیل اینکه این روش نسبت به روش قطره چسبیده مایع بیشتری نیاز دارد، این امر می‌تواند در بعضی شرایط مشکل‌ساز باشد (به‌عنوان مثال، جامد پس از شناور شدن درون مایع دچار تورم شود، یا پوشش روی سطح جامد امکان دارد توسط مایع آسیب ببیند و یا درون مایع حل شود).

● اندازه‌گیری زوایای تماس پیشروی و پسروی به روش قطره چسبیده

● قطره روی سطح افقی

○ تزریق از بالا

همانند شکل (۸-ب)، با استفاده از یک میکرو سرنگ موتوردار حجم مایع را روی سطح افزایش می‌دهیم و در حین افزایش حجم، زاویه تماس افزایش پیدا کرده و سپس ثابت می‌ماند. زاویه تماس ثابت شده، زاویه تماس پیشروی است. با مکش حجم قطره از روی سطح، حجم قطره کوچک می‌شود. به این ترتیب که ابتدا زاویه تماس کاهش یافته و سپس ثابت می‌ماند. زاویه تماس ثابت هنگام کاهش حجم قطره، زاویه تماس پسروی است. البته گاهی ممکن است در حین پسروی زاویه تماس ثابت نشود. در این صورت زاویه تماس پسروی صفر است.

○ تزریق از پایین

از آنجا که وجود سرنگ در قطره در بعضی از الگوریتم‌های اندازه‌گیری زاویه تماس باعث بوجود آمدن خطا می‌شود، گاهی برای رفع این مشکل، سرنگ از داخل قطره خارج می‌شود که البته خارج کردن سرنگ از قطره برای سطوح فوق‌آبگریز تقریباً غیرممکن است زیرا قطره نیز با سرنگ از سطح جدا خواهد شد. برای رفع این مشکل، تزریق از پایین پیشنهاد شده‌است. البته این نوع تزریق ملزم به سوراخ کردن نمونه است. بعضی از نمونه‌ها این قابلیت را ندارند و در ضمن الگوریتم‌های جدید می‌توانند با وجود سرنگ، زاویه تماس را به راحتی اندازه‌گیری نمایند؛ بنابراین، در بسیاری از موارد تزریق از پایین پیشنهاد نمی‌شود.

● قطره روی سراسیبه

در این روش، صفحه زیرین قطره به آهستگی از حالت افقی

$$F = \gamma_{lv} p \cos \theta - V \Delta \rho g \quad \text{(معادله ۹)}$$

که در آن: (p) محیط خط تماس و (V) حجم مایع جابجا شده است. در صورتی که کشش سطحی مایع-جامد مشخص باشد، زاویه تماس به راحتی قابل محاسبه است.

● اندازه‌گیری زاویه تماس روی پودر

اندازه‌گیری زاویه تماس روی پودرها به صورت مستقیم و غیرمستقیم تقریباً غیرممکن است. برای حل این مشکل، پودر و گرانول فشرده می‌شود تا به شکل یک کیک صاف درآید و سپس قطره مایع روی آن ریخته شده و زاویه تماس به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود [۷۹-۸۴]. ولی به دلیل ساختار ذاتی متخلخل پودر و گرانول، زاویه تماس روی سطح فشرده شده، برابر با زاویه تماس محاسبه شده روی سطح صاف و غیرمتخلخل همان ماده نیست (زاویه تماس روی سطح متخلخل یک ماده بیشتر از سطح صاف همان ماده است [۸۵]). همچنین، زاویه تماس از زبری سطح، تورم ذرات و تخلخل صفحه، تأثیر می‌پذیرد [۷۳، ۸۶ تا ۸۹]. علاوه بر این، ذرات پودر که در قسمت بالا قرار دارند، در اثر نیروهای کشش سطحی دچار تغییر شکل پلاستیک شده و همین امر نیز باعث می‌شود تا نتایج با حالتی که پودر فشرده نشده است، متفاوت باشد [۷۳]. برای حل این مشکلات، روش نفوذ مویین پیشنهاد شده است. در روش نفوذ مویین واشبرن^{۴۱} زاویه تماس به نرخ نفوذ مایع درون پودر فشرده شده، نسبت داده می‌شود [۹۰]. به این صورت که عمق نفوذ مایع به صورت تابعی از زمان است و زاویه تماس از طریق معادله زیر به کمک تئوری واشبرن محاسبه می‌شود:

$$l^2 = \frac{rt\gamma_{lv} \cos \theta}{2\eta} \quad \text{(معادله ۱۰)}$$

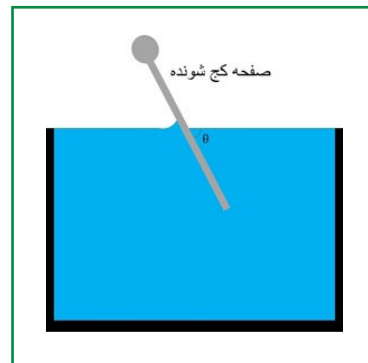
که در آن: (l) عمق نفوذ مایع، (η) گرانیوی، (t) زمان نفوذ و (r) شعاع تخلخل است. به کمک اندازه‌گیری کیفی انجام شده روی چندین نمونه، از لحاظ تئوری بهبود یافتگی این روش تایید شده است [۹۱ تا ۹۳]. این روش به طور معمول به جذب ستونی معروف است و روش مشابه دیگری نیز وجود دارد که جذب لایه نازک نام دارد.

● کاربردهای اندازه‌گیری زاویه تماس

● انرژی سطح جامد

یکی از مهم‌ترین کاربردهای اندازه‌گیری زاویه تماس تعیین انرژی سطح جامدات است. ارزیابی انرژی سطح جامدات برای دهه‌ها از اهمیت بنیادین و کاربردی برخوردار بوده است [۹۴]. از آن جایی که بیشتر روش‌های موجود برای

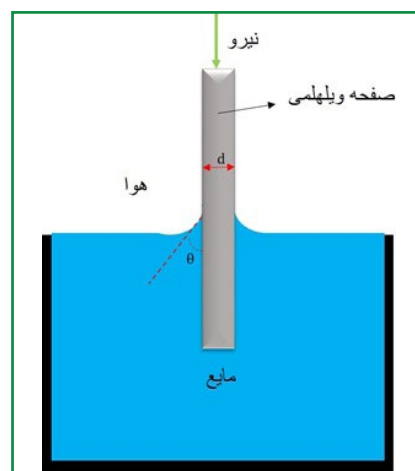
نوع اندازه‌گیری هستند. فوکز^{۳۶} و هارکینز^{۳۷} دقت این روش را با به کارگیری موانع شیشه‌ای به منظور تمیز کردن سطح و یک فیلم تراز برای تشخیص آلودگی‌ها در سطح مایع بهبود بخشیدند [۷۳]. آن‌ها همچنین از یک میکروسکوپ مجهز به عدسی چشمی استفاده کردند تا از قرار داشتن لبه سطح مقطع جامد-مایع روی محور چرخش مطمئن شوند. این روش، برای اندازه‌گیری زوایای کوچک (کمتر از ۱۰°) نیز استفاده می‌شود [۷۴]. اسمدلی^{۳۸} و کولز^{۳۹} با هدف اندازه‌گیری دقیق زاویه تماس، از پرتو لیزر روبشی به همراه صفحه کج شونده کمک گرفتند تا خط تماس متحرک را مطالعه کنند [۷۵]. این روش برای اندازه‌گیری زوایای تماس بالای ۹۰ درجه مناسب نیست چرا که انحنا به خوبی قابل مشاهده نیست.



شکل (۹): نمایی از صفحه کج شونده [۷۶].

● صفحه ویلهلمی

روش ترازوی ویلهلمی، به طور غیرمستقیم برای اندازه‌گیری زاویه تماس روی نمونه جامد به کار گرفته می‌شود [۷۷]. هر گاه، یک ورق باریک و صاف مطابق شکل (۱۰) به صورت عمودی با مایع تماس داشته باشد، تغییری در نیرویی که ترازو اندازه‌گیری می‌کند، مشاهده می‌شود.



شکل (۱۰): نمایی از ورق ویلهلمی [۷۸].

این نیرو در اثر نیروهای شناوری و مولفه در راستای سطح کشش سطح است. نیروی مشاهده شده روی ترازو با توجه به معادله زیر به این شکل است:

است که این عامل در مقیاس نانو همچنان نیاز به مطالعه دارد و بسیاری از مسائل آن مبهم باقی مانده است. در مقیاس‌های کوچک تأثیر جاذبه در مقایسه با کشش سطحی بسیار ناچیز است و شکل قطره قسمتی از یک کره است. با کوچکتر شدن قطره، تأثیر کشش خطی نیز در مقایسه با کشش سطحی در خط تماس سه فاز بزرگتر می‌شود [۱۱۸ و ۱۱۹]. برای قطرات با ابعاد میکرو یا حتی نانو، کشش خطی تأثیر غیرقابل انکاری بر زاویه تماس اندازه‌گیری شده می‌گذارد [۱۲۰]. بنابراین، در مقیاس میکرو و نانو، معادله کلاسیک یانگ باید اصلاح شود:

$$\cos \theta_s = \cos \theta_y - \frac{\sigma}{\gamma_{lv} R} \quad \text{(معادله ۱۱)}$$

که در آن: (θ_s) زاویه تماس یک قطره چسبیده در مقیاس میکرو یا نانو، (R) شعاع سطح تر شده قطره و (σ) کشش خطی در خط ۳ فاز است. محدوده کشش خطی بسیار وسیع است و می‌تواند مثبت یا منفی نیز باشد.

۱. کج کردن دوربین برای دیدن دقیق نقطه ۳ گانه: برای مشاهده دقیق خط تماس، سایه قطره باید در تصویر مشخص باشد. به این منظور یک روال معمول و ضروری برای تشخیص نقطه تماس، چرخش عقب به جلو دوربین است [۱۲۱]. خطای احتمالی در اندازه‌گیری زاویه تماس ناشی از چرخش عقب به جلو دوربین تا چرخش ۱۰ درجه، کمتر از ۱ درجه است [۱۶]. با این حال حداکثر ۴ درجه چرخش برای مشاهده نقطه ۳ گانه کافیست.

۲. آلودگی سطح به واسطه تماس دست: از نکات مهمی که در هنگام اندازه‌گیری زاویه تماس نباید فراموش کرد پیشگیری از تماس دست با سطح جامد است. زیرا هر گونه آلودگی سطح باعث تغییر انرژی سطحی جامد و متعاقباً خواص ترشوندگی آن می‌شود. در نهایت، نتایج غیرقابل اعتماد خواهند بود. همچنین، برای بررسی زاویه تماس بهتر است که از مایعات خالص استفاده کرد که تأثیر ناخالصی‌ها به حداقل برسد. هر گونه ناخالصی قابلیت تغییر کشش سطحی مایع را دارد که این امر می‌تواند خطای فاحشی در اندازه‌گیری ایجاد کند.

۳. ناخالصی مایع:

یکی از موارد موثر در اندازه‌گیری زاویه تماس، وجود ناخالصی در آب است. بنابراین، به‌طور معمول در اندازه‌گیری زاویه تماس از آب یون‌زدایی شده استفاده می‌شود. برای اطمینان از کیفیت آب قبل از اندازه‌گیری زاویه تماس به‌طور معمول کشش سطحی آب با روش قطره آویزان اندازه‌گیری می‌شود.

اندازه‌گیری انرژی سطح به تغییر شکل سطح وابسته هستند و تغییر شکل در مورد جامدات بسیار سخت است، انرژی سطح جامدات نمی‌تواند به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شود. چند روش غیرمستقیم برای ارزیابی انرژی سطحی جامدات توسعه یافته است که در میان آن‌ها زاویه تماس آسان‌ترین و کاربردی‌ترین است [۹۵].

● کشش سطحی مایع

روش‌های تحلیل شکل قطره برای اندازه‌گیری کشش سطحی بیشتر مبتنی بر تجزیه و تحلیل شکل یک قطره آویزان هستند [۹۶ تا ۹۸]. برای قطره بی‌پایه با دانستن زاویه تماس و تجزیه و تحلیل شکل قطره دارای تقارن محوری [۹۹ و ۱۰۰] نیز می‌توان کشش سطحی را محاسبه کرد.

● چسبندگی قطره به سطح

زدودن و پاک کردن قطرات مایع از سطوح جامد در حوزه‌های مختلف از جمله هوا فضا [۱۰۱]، فناوری پیل‌های سوختی [۱۰۲ و ۱۰۳]، سطوح خود تمیز شونده [۹۴]، توربین‌های بادی [۹۴] و پالایش نفت [۱۰۴ و ۱۰۵] یک چالش اساسی است. از دیدگاه انرژی، تصور می‌شود که چسبندگی در سطح تماس رخ می‌دهد (نظریه‌های ونزل و کسی-بکستر). ولی از دیدگاه مکانیکی چسبندگی قطره در خط سه فاز، جایی که فازهای مایع، هوا و جامد به هم می‌رسند، آشکار می‌شود [۱۰۶ تا ۱۱۱]. نیروهای موجود در خط تماس نیروهای کشش سطحی هستند. نیروی چسبندگی که با نیروی خارجی مخالف است (به‌عنوان مثال، گرانش) را می‌توان با انتگرال نیروهای کشش سطحی در امتداد خط تماس پیدا کرد [۱۱۲]. محاسبه این انتگرال و در نتیجه نیروی چسبندگی بین قطره و سطح منوط به داشتن زاویه تماس در امتداد خط تماس است.

● میزان ترشوندگی

دانستن مقدار زاویه تماس به‌عنوان معیاری کمی برای تعیین و مقایسه میزان ترشوندگی مایعات روی سطوح متفاوت است. تغییر میزان ترشوندگی کاربردهای گوناگونی در علوم و صنایع پیشرفته دارد. به‌عنوان مثال، بررسی ترشوندگی یک سطح توسط یک رنگ ساخته شده [۱]، قابلیت خودتمیزشوندگی سطوح [۱۱۳]، زدودن یخ از بدنه هواپیماها [۱۱۴]، جداسازی سیالات نفتی [۱۱۵]، جوش‌پذیری و اتصال آلیاژها [۱۱۶ و ۱۱۷] و خوردگی در محیط‌های تر [۳]، همگی وابسته به بررسی و اندازه‌گیری زاویه تماس هستند.

● نکات مهم در اندازه‌گیری زاویه تماس

● قطره کوچک ۴۲

زاویه تماس یک عامل ماکروسکوپی است. این در حالی

اهمیت پدیده ترشوندگی در مباحثی مانند ایجاد پوشش ایجاب می‌کند تا زاویه تماس که بهترین معیار ترشوندگی است، با مناسب‌ترین روش و به نحو شایسته اندازه‌گیری شود. از همین رو، تاکنون روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری زاویه تماس ارائه شده‌است که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارد. با توجه به شرایط مواد آزمایش شونده و انتظارات پژوهش‌گر از پاسخ آزمایش، باید روشی مناسب را انتخاب کرد تا نتیجه تکرارپذیر و قابل قیاس با سایر تحقیقات انجام شده باشد. در این مقاله، روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس مورد بررسی قرار گرفتند. از میان این روش‌ها، تنها روش قطره چسبیده به دلیل سادگی و در دسترس بودن و قابل کاربرد بودن، برای اندازه‌گیری زاویه تماس قطره روی سطح بیشتر مواد، بسیار رایج است. البته این روش برای پودرها توصیه نمی‌شود و از آزمایش‌های نفوذ برای اندازه‌گیری زاویه تماس پودرها استفاده می‌شود. همه روش‌های ذکر شده از لحاظ ابعاد اندازه‌گیری وجه مشترکی دارند که زاویه تماس ماکرو را ارائه می‌دهد. مطالب ارائه شده در این مقاله به محقق کمک می‌کند تا با دانش کافی در مورد روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس، بهترین روش را به‌منظور ارائه نتایج قابل قبول و مطمئن انتخاب کند.

پی‌نوشت

۱. استاد یار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران
۲. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه تکنولوژی شیمی پکن، چین
۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه تکنولوژی شیمی پکن، چین
۴. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی و علم مواد
5. Young
6. wenzel
7. Cassie-Baxter
8. Wilhelmy
9. Budziak
10. Neumann
11. Kwok
12. Schwartz
13. Bascom
14. Romans
15. Roe
16. James Jurin
17. Capillary bridge
18. Restango
19. Laplace
20. Bigelow
21. W.A. Zisman
22. Rame-hart
23. Philips
24. Riddiford
25. McIntyre
26. Fisher
27. Axis-symmetric drop shape analysis (ADSA)
28. Snake
29. Sub-pixel polynomial fitting (SPPF)
30. <https://www.jikangroup.com/>
31. Taggart
32. McDougal
33. Ockrent
34. Adam
35. Jessop
36. Fowkes
37. Harkins
38. Smedley
39. Coles
40. Wilhelmy
41. Washburn
42. line tension

مراجع

- [1] Knott, W., K. Lehmann, and S. Silber, Use of organofunctionally modified polysiloxanes containing phenyl derivatives as dispersants and wetting agents for fillers and pigments in aqueous pigment pastes and ink or paint formulations. 2006, Google Patents.
- [2] Kavalenka, M.N., et al., Adaptable bioinspired special wetting surface for multifunctional oil/water separation. *Scientific reports*, 2017. 7(1): p. 1-10.
- [3] Ejenstam, L., et al., The effect of superhydrophobic wetting state on corrosion protection–The AKD example. *Journal of colloid and interface science*, 2013. 412: p. 56-64.
- [4] Plissonnier, M., F. Gaillard, and Y. Fouillet, Hydrophobic surface coating with low wetting hysteresis, method for depositing same, microcomponent and use. 2011, Google Patents.
- [5] Määttänen, A., et al., Wetting and print quality study of an inkjet-printed poly (3-hexylthiophene) on pigment coated papers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010. 367(1-3): p. 76-84.
- [6] Breitenbach, J., I.V. Roisman, and C. Tropea, Heat transfer in the film boiling regime: Single drop impact and spray cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017. 110: p. 34-42.
- [7] Pandit, S.K., et al., Development of stain resistant, superhydrophobic and self-cleaning coating on wood surface. *Progress in Organic Coatings*, 2020. 139: p. 105453.
- [8] Syafiq, A., et al., Transparent self-cleaning coating of modified polydimethylsiloxane (PDMS) for real outdoor application. *Progress in Organic Coatings*, 2019. 131: p. 232-239.
- [9] Nikolov, A., P. Wu, and D. Wasan, Structure and stability of nanofluid films wetting solids: An overview. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019. 264: p. 1-10.
- [10] Plog, J., et al., Control of Direct Written Ink Droplets Using Electrowetting. *Langmuir*, 2019. 35(34): p. 11023-11036.
- [11] Dey, R., et al., Soft electrowetting. *Soft matter*, 2019. 15(32): p. 6469-6475.
- [12] Yuan, Y. and T.R. Lee, Contact angle and wetting properties, in *Surface science techniques*. 2013, Springer. p. 3-34.
- [13] Johnson, B.E. and F. Daniels, Lysosomes and the Reactions of Skin to Ultraviolet Radiation**From the Division of Dermatology Cornell University Medical College, New York, New York 10021. *Journal of Investigative Dermatology*, 1969. 53(2): p. 85-94.
- [14] Neumann, A.W. and R.J. Good, Thermodynamics of contact angles. I. Heterogeneous solid surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1972. 38(2): p. 341-358.
- [15] Wenzel, R.N., Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936. 28(8): p. 988-994.
- [16] Chini, S.F., V. Bertola, and A. Amirfazli, A methodology to determine the adhesion force of arbitrarily shaped drops with convex contact lines. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013. 436: p. 425-433.
- [17] Zhao, T. and L. Jiang, Contact angle measurement of natural materials. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2018. 161: p. 324-330.
- [18] Kwok, D.Y. and A.W. Neumann, Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in colloid and interface science*, 1999. 81(3): p. 167-249.
- [19] Bateni, A., et al., A high-accuracy polynomial fitting approach to determine contact angles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2003. 219(1-3): p. 215-231.
- [20] Carroll, B., The accurate measurement of contact angle, phase contact areas, drop volume, and Laplace excess pressure in drop-on-fiber systems. *Journal of colloid and interface science*, 1976. 57(3): p. 488-495.
- [21] Cain, J.C., et al., *J. Colloid Interface Sci.*, 1983. 94: p. 123.
- [22] Shimokawa, M. and T. Takamura, *J. Electroanal. Chem. Interfacial Electrochem.*, 1973. 41: p. 359
- [23] Neumann, A.W., *Z. Phys. Chem.*, 1964. 41: p. 339
- [24] Kwok, D.Y., C.J. Budziak, and A.W. Neumann, *J. Colloid Interface Sci.*, 1995. 173: p. 143
- [25] Budziak, C.J. and A.W. Neumann, *Colloids Surf. A*, 1990. 43: p. 279
- [26] Kloubek, J. and A.W. Neumann, *Tenside* 1969. 6: p. 4

- [27] Neumann, A.W. and W. Tanner, *Tenside*, 1967. 4: p. 220
- [28] Jordan, D.D. and J.E. Lane, *Austral. J. Chem.*, 1964. 17: p. 7
- [29] Schwartz, A.M. and C.A. Rader, in *Congr. Surface Activity*. 1964: Brussels. p. 383
- [30] Schwartz, A.M. and F.W. Minor, *J. Colloid Sci.*, 1959. 14: p. 572
- [31] Bascom, W.D. and J.B. Romans, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, 1968. 7: p. 172
- [32] Roe, R.J., *J. Colloid Interface Sci.*, 1975. 50: p. 70
- [33] Rapacchietta, A.V., A.W. Neumann, and S.N. Omenyi, *J. Colloid Interface Sci.*, 1977. 59: p. 541
- [34] Rapacchietta, A.V. and A.W. Neumann, *J. Colloid Interface Sci.*, 1977. 59: p. 555
- [35] Princen, H.M., in *Surface and Colloid Science*. Vol. 2. 1969, New York: Wiley.
- [36] Fort, T. and H.T. Patterson, *J. Colloid Interface Sci*, 1967. 29: p. 185
- [37] Popescu, M.N., J. Ralston, and R. Sedev, *Capillary Rise with Velocity-Dependent Dynamic Contact Angle*. *Langmuir*, 2008. 24(21): p. 12710-12716.
- [38] Good, R.J. and J.K. Pascheck, in *Wetting, Spreading and Adhesion*. 1978, New York: Academic Press.
- [39] Vagharchakian, L., F. Restagno, and L. Léger, *J. Phys. Chem. B*, 2009. 113: p. 3769
- [40] Restagno, F., et al., *Langmuir* 2009. 25: p. 11188
- [41] Bresme, F., Chapter 8 - Theoretical approaches to investigate anisotropic particles at fluid interfaces, in *Anisotropic Particle Assemblies*, N. Wu, D. Lee, and A. Striolo, Editors. 2018, Elsevier: Amsterdam. p. 233-260.
- [42] Restagno, F., et al., *Contact angle and contact angle hysteresis measurements using the capillary bridge technique*. *Langmuir*, 2009. 25(18): p. 11188-11196.
- [43] Cohen, C., et al., *Langmuir* 2010. 26: p. 15345
- [44] Rioboo, R., et al., *Langmuir* 2010. 26: p. 4873
- [45] Bigelow, W.C., D.L. Pickett, and W.A.J. Zisman, *Coll. Sci.*, 1946. 1: p. 513.
- [46] Shaker, M., E. Salahinejad, and F. Ashtari-Mahini, *Hydrophobization of metallic surfaces by means of Al₂O₃-HDTMS coatings*. *Applied Surface Science*, 2018. 428: p. 455-462.
- [47] Zisman, W.A., *Adv. Chem. Ser.*, 1968. 87: p. 1.
- [48] Spelt, J.K., D.R. Absolom, and A.W. Neumann, *Langmuir* 1986. 2: p. 620
- [49] Phillips, M.C. and A.C. Riddiford, *J. Colloid Interface Sci*, 1972. 41: p. 77
- [50] McIntyre, D.E., *A study of dynamic wettability on a hydrophobic surface*, in *The Institute of Paper Chemistry*. 1969: Appleton.
- [51] Fenrick, W.J., *Rev. Sci. Instrum*, 1964. 35: p. 1616
- [52] Fisher, L.R., *J. Colloid Interface Sci.*, 1979. 72: p. 200
- [53] Chini, S.F. and A. Amirfazli, *A method for measuring contact angle of asymmetric and symmetric drops*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2011. 388(1-3): p. 29-37.
- [54] Leja, J. and G.W. Poling, *On the interpretation of contact angle in Proceedings of the 5th Mineral Processing Congress*. 1960, IMM: London. p. 325.
- [55] Smithwick, R.W., *J. Colloid Interface Sci*, 1988. 123: p. 482
- [56] Rotenberg, Y., L. Boruvka, and A. Neumann, *Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interfaces*. *Journal of colloid and interface science*, 1983. 93(1): p. 169-183.
- [57] Duda, R.O. and P.E. Hart, *Pattern classification and scene analysis*. Vol. 3. 1973: Wiley New York.
- [58] Cheng, P., et al., *Automation of axisymmetric drop shape analysis for measurements of interfacial tensions and contact angles*. *Colloids and Surfaces*, 1990. 43(2): p. 151-167.
- [59] Li, L., W. Kang, and D. Ye. *A Contact Angle Measurement Method for the Droplets in EWOD-based Chips*. in *2007 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. 2007.
- [60] CABRERIZO-VILCHEZ, M.A., *Wetting on chemically heterogeneous surfaces: pseudo-spherical approximation for sessile drops*. *Contact Angle, Wettability and Adhesion*, 2006. 4: p. 183.
- [61] Stalder, A.F., et al., *A snake-based approach to accurate determination of both contact points and contact angles*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006. 286(1): p. 92-103.

- [62] Chini, S.F. and A. Amirfazli, A method for measuring contact angle of asymmetric and symmetric drops. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2011. 388(1): p. 29-37.
- [63] Neumann, A., et al., *Surface and Colloid Science*. Plenum, 1979. 11: p. 31-91.
- [64] Hunter, R.J., *Foundations of Colloid Science*. 2 ed. 2001, Oxford: Clarendon Press.
- [65] Drelich, J., J.D. Miller, and R.J. Good, The Effect of Drop (Bubble) Size on Advancing and Receding Contact Angles for Heterogeneous and Rough Solid Surfaces as Observed with Sessile-Drop and Captive-Bubble Techniques. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996. 179(1): p. 37-50.
- [66] Taggart, A.F., T.C. Taylor, and C.R. Ince, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, 1930. 87: p. 285
- [67] MacDougall, G. and C. Ockrent, *Proc. R. Soc.*, 1942. 180A: p. 151.
- [68] Pierce, E., F.J. Carmona, and A. Amirfazli, *Colloids Surf. A*, 2008. 323: p. 73
- [69] Krasovitski, B. and A. Marmur, *Langmuir* 2005. 21: p. 3881
- [70] Jiang, M. and B. Zhou, Droplet behaviors on inclined surfaces with dynamic contact angle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020. 45(54): p. 29848-29860.
- [71] Eral, H. and J. Oh, Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications. *Colloid and polymer science*, 2013. 291(2): p. 247-260.
- [72] Adam, N.K. and G.J. Jessop, *Chem. Soc.*, 1925. 127: p. 1863
- [73] Fowkes, F.M. and W.D. Harkins, *J. Am. Chem. Soc.*, 1940. 62: p. 337
- [74] Spreece, A.L., C.P. Rutkowski, and G.L.G. Jr, *Rev. Sci. Instrum.*, 1957. 28: p. 636
- [75] Smedley, G.T. and D.E. Coles, *J. Colloid Interface Sci*, 2005. 286: p. 310
- [76] Smedley, G.T. and D.E. Coles, A refractive tilting-plate technique for measurement of dynamic contact angles. *Journal of colloid and interface science*, 2005. 286(1): p. 310-318.
- [77] Wilhelmy, L.A., *Ann. Phys.*, 1863. 119: p. 117
- [78] Karim, A.M. and H.P. Kavehpour, Effect of viscous force on dynamic contact angle measurement using Wilhelmy plate method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018. 548: p. 54-60.
- [79] Vargha-Butler, E.I., S.J. Sveinsson, and Z. Policova, *Colloids Surf. A*, 1991. 58: p. 271
- [80] Neumann, A.W., et al., *Colloid Polym. Sci.*, 1991. 55: p. 49
- [81] Steiner, V. and G. Adam, *Cell Biophys.*, 1984. 6: p. 279
- [82] Liao, W.C. and J.L. Zatz, *J. Pharm. Sci.*, 1979. 68: p. 488
- [83] Lerk, C.F., et al., *J. Pharm. Sci.*, 1977. 66: p. 1480
- [84] Zografi, G. and S.S. Tam, *J. Pharm. Sci.*, 1976. 65: p. 1145
- [85] Shuttleworth, R. and G.L.J. Bailey, *Discuss. Faraday Soc.*, 1948. 3: p. 16
- [86] Buckton, G. and J.M. Newton, *Powder Technol.*, 1986. 46: p. 201
- [87] Buckton, G. and J.M. Newton, *J. Pharm Pharmacol.*, 1985. 37: p. 605
- [88] Hansford, D.T., D.J.W. Grant, and J.M. Newton, *Powder Technol.*, 1980. 26: p. 119
- [89] Langmuir, I. and V.J. Schaeffer, *J. Am. Chem. Soc.*, 1937. 59: p. 2400
- [90] Washburn, E.W., *Phys. Rev.*, 1921. 17: p. 374
- [91] Levine, S., et al., *J. Colloid Interface Sci.*, 1980. 73: p. 136
- [92] Fisher, L.R. and P.D. Lark, *J. Colloid Interface Sci.*, 1979. 69: p. 486
- [93] Good, R.J. and N.J. Lin, *J. Colloid Interface Sci.*, 1976. 54: p. 52
- [94] Zhang, K., et al., Self-cleaning of hydrophobic rough surfaces by coalescence-induced wetting transition. *Langmuir*, 2019. 35(6): p. 2431-2442.
- [95] Navarro, F., *Cellulose nanocrystals: Size characterization and controlled deposition by inkjet printing*. 2010, NC State University.
- [96] Malcolm, J.D. and C.D. Elliott, Interfacial tension from height and diameter of a single sessile drop or captive bubble. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1980. 58(2): p. 151-153.
- [97] Maze, C. and G. Burnet, Modifications of a non-linear regression technique used to calculate surface tension from sessile drops. *Surface Science*, 1971. 24(1): p. 335-342.

- [98] Maze, C. and G. Burnet, A non-linear regression method for calculating surface tension and contact angle from the shape of a sessile drop. *Surface Science*, 1969. 13(2): p. 451-470.
- [99] Cheng, P., et al., Automation of axisymmetric drop shape analysis for measurements of interfacial tensions and contact angles. *Colloids and Surfaces*, 1990. 43(2): p. 151-167.
- [100] Rotenberg, Y., L. Boruvka, and A.W. Neumann, Determination of surface tension and contact angle from the shapes of axisymmetric fluid interfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1983. 93(1): p. 169-183.
- [101] Tan, S. Effects of large droplet dynamics on airfoil impingement characteristics. in 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2005.
- [102] Kumbur, E.C., K.V. Sharp, and M.M. Mench, Liquid droplet behavior and instability in a polymer electrolyte fuel cell flow channel. *Journal of Power Sources*, 2006. 161(1): p. 333-345.
- [103] Lan, H., et al., Simulation and measurement of 3D shear-driven thin liquid film flow in a duct. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008. 29(2): p. 449-459.
- [104] Kralchevsky, P.A., et al., Detachment of Oil Drops from Solid Surfaces in Surfactant Solutions: Molecular Mechanisms at a Moving Contact Line. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005. 44(5): p. 1309-1321.
- [105] Kolev, V.L., et al., Spontaneous detachment of oil drops from solid substrates: governing factors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003. 257(2): p. 357-363.
- [106] Cheng, D.F. and T.J. McCarthy, Using the Fact that Wetting Is Contact Line Dependent. *Langmuir*, 2011. 27(7): p. 3693-3697.
- [107] Bartell, F.E. and J.W. Shepard, The Effect of Surface Roughness on Apparent Contact Angles and on Contact Angle Hysteresis. I. The system Paraffin-Water-Air. *The Journal of Physical Chemistry*, 1953. 57(2): p. 211-215.
- [108] Bartell, F.E. and J.W. Shepard, Surface Roughness as Related to Hysteresis of Contact Angles. II. The Systems Paraffin-3 Molar Calcium Chloride Solution-Air and Paraffin-Glycerol-Air. *The Journal of Physical Chemistry*, 1953. 57(4): p. 455-458.
- [109] Pease, D.C., The Significance of the Contact Angle in Relation to the Solid Surface. *The Journal of Physical Chemistry*, 1945. 49(2): p. 107-110.
- [110] Gao, L. and T.J. McCarthy, How Wenzel and Cassie Were Wrong. *Langmuir*, 2007. 23(7): p. 3762-3765.
- [111] Gao, L. and T.J. McCarthy, An Attempt to Correct the Faulty Intuition Perpetuated by the Wenzel and Cassie "Laws". *Langmuir*, 2009. 25(13): p. 7249-7255.
- [112] Pilat, D.W., et al., Dynamic Measurement of the Force Required to Move a Liquid Drop on a Solid Surface. *Langmuir*, 2012. 28(49): p. 16812-16820.
- [113] Fürstner, R., et al., Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces. *Langmuir*, 2005. 21(3): p. 956-961.
- [114] Dotan, A., et al., The relationship between water wetting and ice adhesion. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2009. 23(15): p. 1907-1915.
- [115] Gupta, P. and B. Kandasubramanian, Directional fluid gating by janus membranes with heterogeneous wetting properties for selective oil-water separation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017. 9(22): p. 19102-19113.
- [116] Zhou, Y. and Q. Lin, Wetting of galvanized steel by Al 4043 alloys in the first cycle of CMT process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014. 589: p. 307-313.
- [117] Naka, M. and I. Okamoto, Wetting of Silicon Nitride by Copper-Titanium or Copper-Zirconium Alloys (Welding Physics, Process & Instrument). *Transactions of JWRI*, 1985. 14(1): p. 29-34.
- [118] Szleifer, I. and B. Widom, Surface tension, line tension, and wetting. *Molecular Physics*, 1992. 75(4): p. 925-943.
- [119] Amirfazli, A. and A. Neumann, Status of the three-phase line tension: a review. *Advances in colloid and interface science*, 2004. 110(3): p. 121-141.
- [120] Peng, H., G.R. Birkett, and A.V. Nguyen, The impact of line tension on the contact angle of nanodroplets. *Molecular Simulation*, 2014. 40(12): p. 934-941.
- [121] Huhtamäki, T., et al., Surface-wetting characterization using contact-angle measurements. *Nature protocols*, 2018. 13(7): p. 1521-1538.

Author

Farshid Chini^{1*}
Majid Shaker²,
Vahdat Zahedi Asl³
Ali Asghar Sadeghi Ghazvini⁴

*chini@ut.ac.ir

1. Department of Mechanical Engineering, University of Tehran
2. M.S. in Materials Science and Engineering, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing China
3. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing China
4. Department of Materials Science and Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

A review on methods of measuring the contact angle of liquids




Abstract

Contact angle is the best criteria for evaluating the wettability and surface energy. Accurate measurement of contact angle enables the coating and paint manufacturers to produce paints with diverse wettability, adhesion and durability. Numerous methods have been utilized for measuring the contact angle, where each has its pros and cons. Based on the materials being tested and expectation of researchers, the suitable method must be selected. In this study, methods for measuring contact angle have been introduced and advances in these methods are investigated. This paper educates the researchers to choose the best technique for measuring the contact angle and achieve acceptable and reliable results.

Keywords

Contact angle; sessile drop; water; liquid; Surface energy.



A review on methods of measuring the contact angle of liquids



Inter Laboratory Comparisons,
Proficiency Testing ,
Why and How?



What is the High-Throughput
Screening (HTS) test method?
Part One: Introduction,
Mechanism and Application



Spectrophotometer application
in measuring nitrite and nitrate
content in fruits and vegetables
and their products through
molecular interferometry.



Comparison the quality of
internal defects evaluation of
metal parts with fuzzy array and
full focus methods



Scanning Probe Microscope
application in the fabrication of
Single Electron Transistors