



ارتباط بین آب‌گریزی و یخ‌گریزی سطوح: تعریف، ارتباط و تحقیقات صورت گرفته

مریم رجبی^۱، سعید رستگار^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۲- استادیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۵ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۴/۴/۶ تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۸ در دسترس به صورت الکترونیک: ۹۴/۶/۸

چکیده

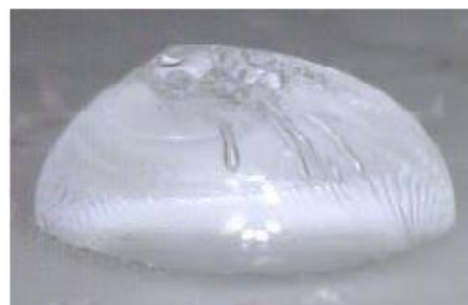
در سال‌های اخیر استفاده از سطوحی با قابلیت یخ‌گریزی سبب بهبود عملکرد صنایع مختلف و صرفه‌جویی در مصرف انرژی گردیده است. در سطوح ابرآب‌گریز چون کاهش تماس بین قطره و سطح و در نتیجه کاهش چسبندگی بین آنها و هم چنین وجود هوای به دام افتاده در زیر قطره به عنوان عایق حرارتی می‌تواند منجر به تاخیر در فرآیند انجماد آب شود، در نتیجه این سطوح می‌توانند به عنوان سطوحی با قابلیت یخ‌گریزی مطرح شوند. هر چند این سطوح همیشه یخ‌گریز نیستند و عملکرد این سطوح تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند آسیب‌های مکانیکی در طی چرخه یخ زدن/یخ‌زدایی و یا تحت اتمسفر مرطوب کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

ابرآب‌گریزی، یخ‌گریزی، چسبندگی یخ، انجماد آب.

چکیده تصویری

یخ‌گریزی





Correlation between hydrophobicity and icephobicity of surfaces: Definition, communication and researches

Maryam Rajabi¹, Saeed Rastegar^{2*}

1- Amirkabir University of Technology, Department of Polymer Engineering and Color Technology, P.O.Box: 15875-4413, Tehran, Iran.

2- Amirkabir University of Technology, Department of Polymer Engineering and Color Technology, P.O.Box: 15875-4413, Tehran, Iran.

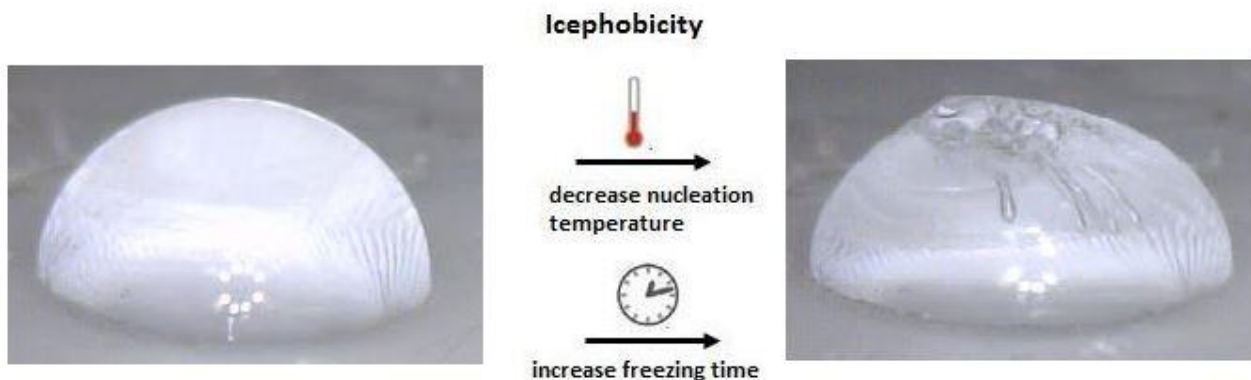
Abstract

In recent years surfaces with icephobicity potential has been developed to improve the performance of various industries and to save the energy. Superhydrophobic surfaces because of reduced contact area between surface and droplet, which lead to decrease of ice adhesion, and also existence trapped air under droplet as a thermal insulation can cause significant delay in water freezing process. Consequently, these surfaces can be considered as icephobic surfaces. Although these surfaces are not always icephobic and performance of these surfaces due to mechanical damage during icing/deicing cycles or in humid atmosphere reduced.

Keywords:

Superhydrophobicity, Icephobicity, Ice adhesion, Water freezing.

Graphical abstract



۱- مقدمه

دارد. نقطه انجماد آب شهری صفر درجه سانتی گراد تعریف می‌شود در صورتی که آب بدون یون را به دلیل عدم وجود مراکز هسته‌گذاری (یون‌ها) می‌توان تا دمای کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد فوق سرد^۳ کرد، به طوری که آب در حالت مایع باقی بماند. طبق مطالعات انجام شده در بهترین حالت در شرایط بدون ارتعاش و آلودگی و جاذبه نزدیک صفر کمترین دمایی که در فشار ۱ اتمسفر می‌توان آب را فوق سرد کرد ۴۵ °C است [۴].

۳- ترمودینامیک انجماد

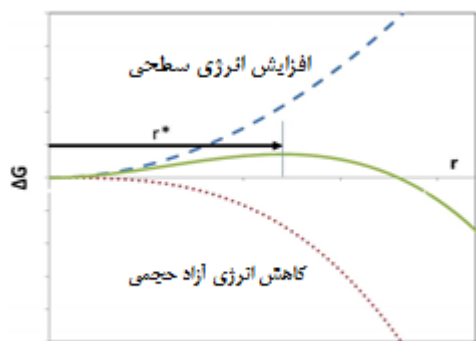
با تشکیل یک هسته در آب فوق سرد به منظور شروع فرآیند انجماد، از یک طرف به دلیل تشکیل یک فصل مشترک جدید انرژی آزاد سیستم افزایش و از طرف دیگر به دلیل تشکیل فاز مطلوب‌تر، انرژی آزاد سیستم کاهش می‌یابد. تغییر کلی در انرژی آزاد سیستم به دلیل این تغییر فاز توسط رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$\Delta G = 4\pi r^2 \gamma_{lw} - \left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3 \Delta H_v \frac{T_m - T}{T_m} \quad (1)$$

که در این رابطه r شعاع هسته و γ_{lw} کشش بین سطحی آب و یخ ΔH_v گرمای نهان ذوب و T_m دمای تعادلی انجماد آب می‌باشد. برای رسیدن به شعاع هسته بحرانی r^* ، سیستم باید بر انرژی فعال‌سازی بحرانی^۴ ΔG^* غلبه کند و بعد از آن به دلیل کاهش انرژی آزاد، هسته به طور خودبخودی رشد می‌یابد (شکل ۱). شعاع هسته بحرانی و انرژی فعال‌سازی از رابطه‌های ۲ و ۳ زیر محاسبه می‌شود [۴، ۵].

$$r^* = \frac{2\gamma_{lw}}{\Delta H_v} \frac{T_m - T}{T_m} \quad (2)$$

$$\Delta G^* = \frac{(16/3)\pi\gamma_{lw}^3}{(\Delta H_v \frac{T_m - T}{T_m})^2} \quad (3)$$



شکل ۱- تغییرات انرژی آزاد سیستم با شعاع هسته [۴]

تجمع و چسبندگی یخ بر روی اکثر سطوح در زمینه‌های مختلف از جمله هواپیما، اتومبیل، کشتی و قایق‌ها، جاده‌ها، توربین‌های بادی و خطوط انتقال انرژی و غیره موجب کاهش بازده و اتلاف انرژی می‌شود. به طور کلی روش‌های جلوگیری از چسبندگی یخ بر روی سطوح به دو دسته اکتیو و پسیو تقسیم می‌شوند. روش اکتیو روشی است که نیاز به وجود یک عامل خارجی دارد مانند: روش‌های مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و شیمیایی. استفاده از این روش‌ها به دلیل مصرف انرژی بالا و مشکلات زیست محیطی با محدودیت روبرو است. به همین دلیل اخیراً روش پسیو به عنوان جایگزینی برای این روش‌ها به کار می‌رود که شامل استفاده از سطوح با قابلیت یخ‌گریزی می‌باشد [۱]. از بین سطوح با ترشوندگی مختلف، سطوح ابرآب‌گریز دینامیک با زاویه تماس بزرگتر از ۱۵۰ و پسماند زاویه تماس کم (معمولاً کمتر از ۱۰ درجه) می‌توانند قابلیت یخ‌گریزی داشته باشند. گرچه زاویه تماس‌های خیلی بالا به همراه پسماند زاویه تماس بالا (اثر برگ گل رز^۱) به عنوان سطوح فوق آب‌گریز استاتیک مطرح می‌باشند اما این سطوح دارای قابلیت یخ‌گریزی نیستند. از مشخصه‌های سطح ابرآب‌گریز دینامیک دفع الاستیک قطرات آب برخوردار می‌باشد. بنابراین از این سطوح در دمای کمتر از دمای انجماد جهت دفع قطرات آب برخوردار می‌شود و جلوگیری از تجمع آب استفاده می‌شود. پوشش‌های پلیمری با انرژی سطحی پایین مانند پلی (تترافلورواتیلن)، پلی (دی متیل سیلوکسان) و کامپوزیت‌های پلیمری با نانوذرات اغلب برای ایجاد سطوح آب‌گریز یا ابرآب‌گریز مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور کلی سه روش مختلف برای بررسی یخ‌گریزی سطوح وجود دارد: ۱) توانایی سطح برای جلوگیری از فرآیند انجماد یا تاخیر در هسته‌گذاری ناهمگن یخ^۲ چسبندگی کم بین یخ و سطح به طوری که تحت تاثیر عوامل طبیعی مانند باد، نیروی وزن، گرمای خورشید و غیره یخ به سهولت از روی سطح جدا شود. ۲) قابلیت دفع قطرات برخوردی به سطح در دمای کمتر از دمای انجماد: اگر زمان برخورد و برگشت قطره از سطح از زمان هسته‌گذاری یخ کمتر باشد قطره قبل از انجماد از سطح دفع می‌شود [۲، ۳].

۲- فرآیند انجماد

فرآیند انجماد آب یک فرآیند هسته‌گذاری و رشد^۲ است که از طریق یکی از دو سازوکار (۱) هسته‌گذاری همگن یا (۲) هسته‌گذاری ناهمگن اتفاق می‌افتد. به بیان دیگر آب جهت انجماد نیاز به تشکیل یک هسته یخی و رشد آن دارد. هسته‌های مورد نیاز فرآیند انجماد یا در اثر تشکیل خوشه‌های مولکولی آب یا به واسطه حضور یک فاز خارجی (مانند گرد و غبار، یون‌ها و ناخالصی‌های آب) شکل می‌گیرند که در این صورت سازوکار انجماد به ترتیب هسته‌گذاری همگن و هسته‌گذاری ناهمگن نام

¹ Rose petal effect
² Nucleation and growth

³ Supercooling
⁴ Critical free energy barrier

مشترک قطره با سطح می‌باشد. به طور کلی سرعت هسته‌گذاری در فصل مشترک نسبت به توده بیشتر است زیرا در فصل مشترک هسته یخی با مولکول‌های آب کمتری احاطه شده و در نتیجه انرژی کمتری جهت تشکیل فصل مشترک یخ-آب نیاز است. سهم هریک از سرعت‌ها در سرعت کل به عوامل مختلفی مانند اندازه قطره، سطح تماس، شیمی سطح و غیره وابسته است. برای قطرات کوچک به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد، سرعت هسته‌گذاری در فصل مشترک بیشتر از سرعت هسته‌گذاری در توده است. از دیدگاه شیمی سطح، در مورد سطوح آب‌دوست، به دلیل زیاد بودن سطح تماس قطره با سطح، سرعت هسته‌گذاری در فصل مشترک غالب‌تر است. در سطوح آب‌گریز سهم هر سه سرعت تقریباً برابر است و بسته به میزان کاهش دما و فوق سرد شدن آب هر کدام از سرعت‌ها می‌تواند غالب شود به طوری که در دماهای کمتر سرعت هسته‌گذاری در فصل مشترک کمتر از سرعت توده دارای اهمیت است. اما در مورد سطوح ابرآب‌گریز به دلیل کاهش شدید سطح تماس سهم سرعت هسته‌گذاری در فصل مشترک نادیده گرفته می‌شود و در نتیجه سرعت کلی کاهش چشمگیری می‌یابد [۷].

۵- انتقال حرارت

هم‌چنین می‌توان با ایجاد سد حرارتی^۲ فرآیند انجماد را به تاخیر انداخت. در سطوح ابرآب‌گریز هوای به دام افتاده در زیر قطره (رژیم کیسی-بکستر^۳)، به عنوان سد حرارتی عمل کرده و با کاهش سرعت انتقال حرارت رسانی از قطره به سطح موجب تاخیر در فرآیند انجماد می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳- جهت انتقال حرارت از قطره به سطح.

۶- چسبندگی یخ

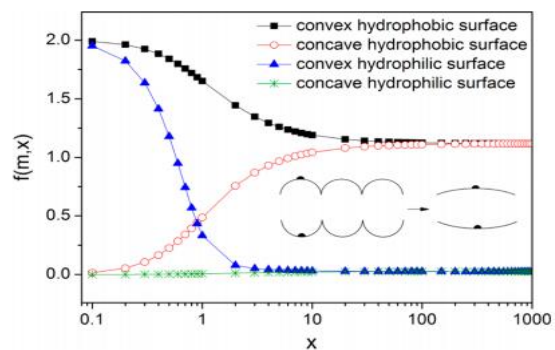
سازوکارهای موثر در چسبندگی یخ به سطوح به طور عمده شامل پیوندهای هیدروژنی، نیروهای بلند دامنه وان دروالسی، درگیری‌های مکانیکی و نیروهای الکترواستاتیک می‌باشند. با توجه به اینکه سطح یخ باردار است یخ موجب القای بار بر روی سطوح خصوصاً فلزی و ایجاد نیروهای الکترواستاتیک بین یخ و سطح می‌شود [۸].

در دماهای منفی بر روی سطح یخ یک لایه آب به وجود می‌آید به طوری که ضخامت آن با کاهش دما کاهش می‌یابد و در دماهای کمتر از ۲۸ °C این لایه ناپدید می‌شود. این لایه به عنوان یک لایه روان‌کننده^۴ عمل کرده و موجب لغزش آسان یخ بر روی سطح و در نتیجه کاهش

انرژی فعال‌سازی هسته‌گذاری ناهمگن کمتر از هسته‌گذاری همگن است (رابطه ۴)

$$\Delta G_{\text{hetero}}^* = f_{(\theta, R)} \Delta G_{\text{homo}}^* \quad (4)$$

طبق رابطه بالا ضریب کاهنده انرژی فعال‌سازی^۱ (f) تابع شیمی سطح (θ) و ناهمواری‌های سطح (R) می‌باشد، به طوری که با افزایش آب‌دوستی سطح، انرژی فعال‌سازی کاهش می‌یابد و تغییر فاز راحت‌تر اتفاق می‌افتد. در نتیجه جهت تاخیر در فرآیند انجماد استفاده از سطوح ابرآب‌گریز بهترین گزینه می‌باشد. در مورد ناهمواری‌های سطح، اگر $R > 10r^*$ باشد با تغییر شعاع انحنا ناهمواری، تاخیر چشمگیری در انجماد خواهیم داشت. در ناهمواری‌های محدب سطح، با افزایش شعاع انحنا مکان محدب و کاهش زاویه تماس، سد انرژی تشکیل هسته یخی کاهش می‌یابد، اما در مورد ناهمواری‌های مقعر با کاهش شعاع انحنا و کاهش زاویه تماس، سد انرژی کاهش می‌یابد (شکل ۲). در نتیجه جهت ایجاد قابلیت یخ‌گریزی انتخاب سطحی باتوزیعی از ناهمواری‌های مقعر و محدب مناسب می‌باشد [۶].



شکل ۲- وابستگی f به شعاع انحنا ناهمواری‌های سطح [۶].

۴- سینتیک انجماد

فرآیند انجماد قطره آب می‌تواند از فصل مشترک مایع-جامد، مایع-هوا و یا از توده شروع شود. سرعت کلی انجماد قطره بر روی سطح مطابق رابطه ۵ می‌باشد.

$$J_{\text{total}} = J_{\text{bulk}} V + J_{\text{water-air}} S_{\text{water-air}} + J_{\text{water-substrate}} S_{\text{water-substrate}} \quad (5)$$

که در این رابطه J_{bulk} سرعت هسته‌گذاری در توده، $J_{\text{water-air}}$ سرعت هسته‌گذاری در فصل مشترک قطره-هوا، $J_{\text{water-substrate}}$ سرعت هسته‌گذاری در فصل مشترک قطره-سطح، V حجم قطره، $S_{\text{water-air}}$ سطح تماس قطره با هوا، $S_{\text{water-substrate}}$ سطح

² Thermal barrier

³ Cassie-Baxter

⁴ Lubricating layer

¹ Lowering index of activation energy

ابرآب‌گریز در قطرات آب فرو می‌روند و با اجرای فرآیند یخ‌زدایی بعد از انجماد قطره، ناهمواری‌های سطح آسیب دیده و همراه با یخ جدا می‌شوند. آسیب مکانیکی ساختار سطح در طی چرخه یخ‌زدن/یخ‌زدایی منجر به افزایش سطح تماس سطح با قطره و کاهش عملکرد این سطوح می‌شود. برای بهبود استحکام سایشی این سطوح می‌توان از ساختارهای خیلی سخت یا الاستیک استفاده کرد. درمورد عملکرد یخ‌گریزی سطوح ابرآب‌گریز در اتمسفر مرطوب اگر ناهمواری‌های سطح در مقایسه با قطرات آب مترکم شده به اندازه کافی کوچک باشد قطرات آب بر روی ناهمواری‌های سطح تشکیل می‌شوند و رژیم ترشوندگی کیسی-بکستر باقی می‌ماند اما در غیر این صورت قطرات آب بین ناهمواری‌ها قرار گرفته و رژیم ترشوندگی ونزل حاصل می‌شود. بنابراین در سطوح ابرآب‌گریز مقیاس‌های کوچک‌تر ناهمواری، جهت باقی ماندن رژیم کیسی-بکستر در شرایط مرطوب مناسب‌تر هستند [۱۶، ۱۷].

۸- تحقیقات صورت گرفته

از جمله مهم‌ترین روش‌های ایجاد سطوح ابرآب‌گریز می‌توان به روش قالبی^۶ [۱۸، ۱۹]، روش ترکیب مواد آلی/ معدنی^۷ [۲۰، ۲۱]، روش الکتروشیمیایی [۲۲، ۲۳]، روش نشانش بخار شیمیایی^۸ [۲۴، ۲۵]، روش پلاسما [۲۶، ۲۷]، روش سل-ژل [۲۸، ۲۹] و غیره اشاره کرد. از بین این روش‌ها روش ترکیب مواد آلی/ معدنی به عنوان روشی موثر برای ایجاد پوشش‌های ابرآب‌گریز در بسیاری از کارهای تحقیقاتی انجام شده مطرح می‌باشد. به عنوان مثال ژانگ^۹ و همکارانش [۳۰] سطح آب‌گریزی با استفاده از اکسید روی/ پلی دی متیل سیلوکسان گزارش کردند. یو^{۱۰} و همکارانش [۳۱] آب‌گریزی سطوح سیلیکا/ پلی (سیلوکسان-فلوئوروآکریلات) مورد مطالعه قرار دادند.

به خوبی شناخته شده است که انجماد با تغییر فاز مایع آب به حالت جامد آن اتفاق می‌افتد. با توجه به مشکلات ناشی از تجمع و چسبندگی یخ بر روی تجهیزات و سطوح مختلف در شرایط سردسیری گستره وسیعی از روش‌های ضد یخ و مطالعات بسیاری در سال‌های اخیر صورت گرفته است. برخی از این مطالعات بر روی استفاده از سطوح ابرآب‌گریز به عنوان راهی برای جلوگیری از این مشکلات متمرکز شده است [۳۱]. اخیراً این سطوح به دلیل کاربردهای بالقوه خود مانند یخ‌گریزی و مه‌گریزی^{۱۱} بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. هونگ^{۱۲} و همکارانش اثر زاویه تماس را بر افزایش زمان انجماد قطرات آب بر سطح مسی و سطح مسی دارای پوشش ابرآب‌گریز بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که هرچه زاویه تماس سطوح بیشتر باشد، زمان انجماد قطره بر روی سطح

چسبندگی آن به سطح می‌شود. البته لازم به ذکر است که اگر ارتفاع ناهمواری‌های سطح بیشتر از ضخامت این لایه باشد در برابر لغزش یخ بر روی لایه آب سد انرژی به وجود می‌آید [۹]. زدودن یخ از سطح با سازوکار شکست^۱ حاصل می‌شود اگر نیروی چسبندگی یخ به سطح زیاد باشد شکست ممکن است در خود یخ^۲ اتفاق بیفتد که ناشی از لیز خوردن مرز دانه‌های بلوری و یا عیوب یخ مانند ترک و حفره‌ها و تنش‌های داخلی ایجاد شده در طی فرآیند انجماد می‌باشد. در این نوع شکست یک لایه نازک یخ در سطح زمینه مشاهده می‌شود. در غیر این صورت شکست در فصل مشترک یخ و سطح^۳، که معمولاً شکاف‌ها در آنجا وجود دارد، می‌تواند اتفاق بیفتد که با جدا شدن یخ از فصل مشترک بدون به جای گذاشتن اثری از خود شناسایی می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده روند کاهشی چسبندگی یخ به سطوح با افزایش زاویه تماس همیشه برقرار نیست بلکه چسبندگی یخ با پسماند زاویه تماس رابطه مستقیم و خطی دارد [۱۰]. کار چسبندگی انرژی آزاد برگشت‌پذیر مربوط به ایجاد و از بین بردن فصل مشترک است و ترشوندگی نیز پدیده‌ای است که با انرژی‌های آزاد مربوط به تشکیل و از بین رفتن نواحی فصل مشترک توصیف می‌شود. بنابراین بین ترشوندگی سطح و کار چسبندگی می‌تواند رابطه ۶ برقرار باشد [۱۱].

$$w_p = \gamma_{lv} (1 + \cos \theta_{rec}) \quad (۶)$$

از دیگر عوامل موثر در چسبندگی یخ به سطح، اختلاف ضریب انبساط حرارتی یخ و سطح می‌باشد که هرچه این اختلاف بیشتر باشد تنش‌های ایجاد شده در فصل مشترک منجر به کاهش چسبندگی می‌شوند. هم چنین انعطاف‌پذیری سطح بر روی چسبندگی یخ اثر می‌گذارد، هر چه انعطاف‌پذیری سطح بیشتر باشد، با تغییر شکل آن تنش‌های بین سطحی در فصل مشترک حاصل می‌شود که بر چسبندگی اثر منفی می‌گذارد. میزان خلوص یخ، ماهیت و ساختار سطح، دما، نوع دستگاه و روش اندازه‌گیری چسبندگی نیز در چسبندگی یخ بسیار حائز اهمیت می‌باشند [۱۲]. جهت اندازه‌گیری چسبندگی یخ به سطوح هیچ دستگاه تجاری استاندارد در دسترس نمی‌باشد. گروه کمی از دستگاه سانتریفیوژ برای اندازه‌گیری استحکام متوسط چسبندگی یخ استفاده کرده‌اند [۱۳، ۱۴، ۱۰]. گروهی نیز از دستگاه‌های خودساز^۴ برای اندازه‌گیری تنش متوسط برای حذف یخ از روی سطح استفاده کرده‌اند [۱۵، ۸، ۱].

۷- ماندگاری سطوح یخ‌گریز

ماندگاری و دوام سطوح یخ‌گریز تحت تاثیر دو عامل مقاومت سایشی کم و تراکم^۵ بخار آب در ناهمواری‌های سطح، کاهش می‌یابد. قله‌های سطوح

⁶ Template method

⁷ Organic/inorganic hybrid method

⁸ Chemical vapor deposition method

⁹ Zhang

¹⁰ Yu

¹¹ Anti-frosting

¹² Huang

¹ Fracture

² Cohesional fracture

³ Adhesional fracture

⁴ Self-made apparatus

⁵ Condensation

سازوکارهای مرتبط با تاخیر در زمان شروع انجماد آب و کل زمان فرآیند انجماد آب به ترتیب با هسته‌گذاری و انتقال حرارت کنترل می‌شود.

۹- نتیجه‌گیری

آب‌گریزی و یخ‌گریزی در مورد تجهیزات و ابزارهای که در محیط‌هایی با دمای کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد کار می‌کنند مانند بال هواپیماها، نیروگاه‌ها، کشتی‌ها، رادارها و حتی لوله‌های داخل محفظه‌های خنک‌کننده و فریزرها بسیار دارای اهمیت است زیرا با تشکیل یخ بر روی آنها ممکن است بازده کاری آن‌ها پایین بیاید. استفاده از سطوح ابرآب‌گریز به عنوان روشی موثر برای جلوگیری از مشکلات ناشی از تجمع و چسبندگی یخ بر روی سطوح مختلف اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با استفاده از این سطوح گرچه نمی‌توان به طور کامل از تشکیل یخ بر روی سطح جلوگیری کرد اما می‌توان چسبندگی یخ به سطح را به طور قابل توجهی کاهش داد به طوری که تحت تاثیر نیروهای طبیعی مانند نیروی باد و یا گرمای خورشید به راحتی یخ از روی سطح جدا شود. از جمله محدودیت‌های این سطوح عدم کارایی آنها با ازدست رفتن ناهمواری‌های سطحی تحت عوامل مختلف مانند تنش‌های مکانیکی و یا تحت تاثیر اتمسفر مرطوب می‌باشد که با متراکم شدن قطرات بخار آب در بین ساختارهای سطحی انتقال رژیم ترشوندگی و نزل به کیسی-بکستر مشاهده می‌شود که این افزایش چسبندگی یخ به سطح را به همراه دارد. در نتیجه استفاده از سطوحی با استحکام مکانیکی بالا و توزیعی از ناهمواری‌های میکرو/نانویی منجر به ایجاد سطوحی یخ‌گریز با ماندگاری بالاتر می‌شود.

طولانی‌تر می‌باشد [۳۲]. هم چنین طبق تحقیقات وانگ^۱ و همکارانش سطوح ابرآب‌گریز با پوشش نانو-فلوئوروکربن نسبت به تاخیر انداختن زمان شروع انجماد آب نسبت به سطوح بدون پوشش بسیار موثر عمل می‌کنند [۳۳]. علاوه بر این نقش ناهمواری سطوح ابرآب‌گریز بر روی رفتار یخ‌گریزی مورد مطالعه قرار گرفته است. جانگ^۲ و همکارانش انجماد قطرات آب فوق سرد (با دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد) برخورد به سطوح مختلف با دمای یکسان را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که سطوح آب دوست با ناهمواری نانومتری (کوچک‌تر از اندازه اولین هسته یخ پایدار تشکیل شده) در مقایسه با سطوح ابرآب‌گریز با میزان ناهمواری‌های بزرگ‌تر و ترشوندگی کمتر تاخیر بیشتری در زمان شروع انجماد دارند [۳۴]. این نشان می‌دهد خاصیت یخ‌گریزی سطح ابرآب‌گریز فقط به میزان ترشوندگی آن وابسته نیست. بنابراین هاو^۳ و همکارانش مطالعه جامعی از برسی تاثیر ناهمواری و میزان ترشوندگی سطوح بر رفتار یخ‌گریزی ارائه دادند. هم نتایج تجربی و هم بررسی‌های تئوری بر پایه تئوری هسته‌گذاری یخ نشان داد که میزان تاخیر در شروع فرآیند انجماد قطرات آب بر روی سطوح صاف با ناهمواری‌های کوچک از سطوح ابرآب‌گریز با ناهمواری‌های بزرگ‌تر بیشتر است، اما با افزایش زاویه تماس زمان کل فرآیند انجماد افزایش می‌یابد در نتیجه سطوح ابرآب‌گریز با ناهمواری‌های میکرو و نانویی بیشترین زمان مربوط به فرآیند انجماد را دارا هستند [۳۵]. محققان به وضوح نشان دادند که

¹ Wang

² Jung

³ Hao

۱۰- مراجع

1. A. J. Meuler, "Relationships between water wettability and ice adhesion", ACS Appli. Mater. Interfaces. 11, 3100-3110, **2010**.
2. V. Hejazi, "From superhydrophobicity to icephobicity: Forces and interaction analysis", Nature's Scientific Reports. 3, 2194, **2013**.
3. Y. Wang, "Verification of Icephobic/anti-icing properties of a superhydrophobic surface", ACS Appli. Mater. Interfaces. 5, 3370-3381, **2013**.
4. L. Oberli, "Condensation and freezing of droplets on superhydrophobic surfaces", Adv. Colloid Interface Sci., **2013**.
5. H. Wang, "Effects of nano-fluorocarbon coating on icing", Appli. Surf. Sci. 258, 7219-7224, **2012**.
6. G. Heydari, "Hydrophobic surfaces: Topography effects on wetting by supercooled water and freezing delay", Physical Chem. C. 117, 21752-21762, **2013**.
7. Alizadeh, A. et al, "Dynamics of ice nucleation on water repellent surfaces", Langmuir, 28, 3180-3186, **2012**.
8. D. K. Sarkar, Superhydrophobic coatings with reduced ice adhesion. Adhes. Sci. Technol., 23(9), 1215-1237, **2009**.
9. L. B. Boinovich, "Anti-icing potential of superhydrophobic coatings", Mendeleev Commun. 23, 3-10, **2013**.
10. S. A. Kulinich, "How wetting hysteresis influences ice adhesion strength on superhydrophobic surfaces", Langmuir, 25(16), 8854-8856, **2009**.
11. Y. He, "Reducing ice adhesion by hierarchical micro-nano-pillars", Appli. Surf. Sci., 305, 589-595, **2014**.
12. G. Fortin, "Ice adhesion models to predict shear stress at shedding", Adhesion sci. technol., 26(4-5), 523-553, **2012**.
13. Meuler, J. Adam, "Relationships between water wettability and ice adhesion", ACS Appli. Mater. Interfaces, 2(11), 3100-3110, **2010**.
14. S. A. Kulinich, "Ice adhesion on super-hydrophobic surfaces", Appli. Surf. Sci., 255(18), 8153-8157, **2009**.
15. D. K. Sarkar, Wetting and superhydrophobic properties of PECVD grown hydrocarbon and fluorinated-hydrocarbon coatings, Appli. Surf. Sci., 256(11), 3698-3701, **2010**.
16. S. Farhadi, "Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces", Appli. Surf. Sci. 257, 6264-6269, **2011**.
17. Guo, Peng, "Icephobic /anti-icing properties of micro/nanostructured surfaces", Adv. Mater. 24, 2642-2648, **2012**.
18. J. Yang, "A novel method to fabricate superhydrophobic surfaces based on well-defined mulberry-like particles and self-assembly of polydimethylsiloxane", Appli. Surf. Sci. 255, 3507-3512, **2009**.
19. W. Hou, "Stable polytetrafluoroethylene superhydrophobic surface with lotus-leaf structure", Colloid and Interface Sci. 333, 400-403, **2009**.
20. A. Qu, "Synthesis of composite particles through emulsion polymerization based on silica/fluoroacrylate-siloxane using anionic reactive and nonionic surfactants", Colloid and Interface Sci. 317, 62-69, **2008**.

21. M. D'Acunzi, "Superhydrophobic surfaces by hybrid raspberry-like particles", *Faraday Discuss.* 146, 35-48, **2010**.
22. G. Zhao, "Fabrication and electrochemical treatment application of a novel lead dioxide anode with superhydrophobic surfaces, high oxygen evolution potential, and oxidation capability", *Environ. Sci. Technol.* 44, 1754-1759, **2010**.
23. W. Song, "Large-area unmodified superhydrophobic copper substrate can be prepared by an electroless replacement deposition", *Colloid Interface Sci.* 329, 1, 208-211, **2009**.
24. Y. Song, "Adhesion and friction properties of micro/nano-engineered superhydrophobic/hydrophobic surfaces", *Thin Solid Films.* 518, 14, 3801-3807, **2010**.
25. C. R. Crick, "Aerosol assisted deposition of melamine-formaldehyde resin: Hydrophobic thin films from a hydrophilic material", *Thin Solid Films.* 519, 7, 2181-2186, **2011**.
26. G.-X. Li, "Preparation of transparent BN films with superhydrophobic surface", *Appli. Surf. Sci.* 254, 5299-5303, **2008**.
27. B. Balu, "Fabrication of "Roll-off" and "Sticky" Superhydrophobic Cellulose Surfaces via Plasma Processing", *Langmuir* 24, 4785-4790, **2008**.
28. S. Lu, "Controlled growth of superhydrophobic films by sol-gel method on aluminum substrate", *Appli. Surf. Sci.* 256, 6072-6075, **2010**.
29. R. Taurino, "Facile preparation of superhydrophobic coatings by sol-gel processes", *Colloid Interface Sci.* 325, 1, 149-156, **2008**.
30. J. Zhang, "Fabrication of zinc oxide/polydimethylsiloxane composite surfaces demonstrating oil-fouling-resistant superhydrophobicity", *ACS Appli. Mater. Interfaces.* 2, 10, 2880-2883, **2010**.
31. Y. Huang, "Preparation and characterization of silica/fluorinated acrylate copolymers hybrid films and the investigation of their icephobicity", *Thin Solid Films.* 520, 17, 5644-5651, **2012**.
32. L. Huang, "Experimental study on frost release on fin-and-tube heat exchangers by use of a novel anti-frosting paint", *Therm Fluid. Sci.* 33, 7, 1049-1054, **2009**.
33. H. Wang, "Effects of nano-fluorocarbon coating on icing", *Appli. Surf. Sci.* 258, 7219-7224, **2012**.
34. S. Jung, "Are superhydrophobic surfaces best for icephobicity", *Langmuir*, 27, 3059-3066, **2011**.
35. P. Hao, "Freezing of sessile water droplets on surfaces with various roughness and wettability", *Appli. Physics Letters*, 104, 161609-161605, **2014**.