

# 表面特性对超声波脱除冷表面冻结液滴的影响

钱晨露<sup>1,2</sup>, 王鑫<sup>1,2</sup>, 李栋<sup>1,2</sup>, 朱琳<sup>1,2</sup>, 赵孝保<sup>1,2</sup>

(1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

(2. 江苏省能源系统过程转化与减排技术工程实验室, 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 本文研究了表面特性对超声波脱除冷表面冻结液滴的影响, 对不同表面特性下超声波对不同粒径和不同冻结时间冻结液滴的脱除效果进行了对比分析. 试验结果表明, 超声波可瞬间脱除冷表面冻结液滴, 且随着表面接触角的增加, 冷表面冻结液滴的脱除概率逐渐增大; 冻结液滴粒径越大, 冻结时间越长, 表面特性对超声波脱除冻结液滴的效果越显著; 与普通铝表面上冻结液滴脱除状况相比, 表面接触角 136° 时, 超声波可完全脱除其表面上冻结液滴. 试验结果为疏水表面应用于超声波抑/除霜提供了数据支撑.

**[关键词]** 表面特性, 超声波, 冻结液滴, 表面接触角, 脱除概率

**[中图分类号]** TK124 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)02-0054-06

## Effects of Surface Characteristics on Frozen Water Droplets Removal from Cold Surface by Means of Ultrasound

Qian Chenlu<sup>1,2</sup>, Wang Xin<sup>1,2</sup>, Li Dong<sup>1,2</sup>, Zhu Lin<sup>1,2</sup>, Zhao Xiaobao<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. Engineering Laboratory of Energy System Process Conversion and Emission Reduction Technology of Jiangsu Province, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Effects of surface characteristics on frozen water droplets removal from cold surfaces by ultrasound are experimentally studied and comparative analysis of effects of ultrasound are carried out on the removing of frozen water droplets with different size and freezing time from cold surface with different surface characteristics. The experimental results indicate that the frozen water droplets on cold surfaces can be instantaneously removed by ultrasound and the removal probabilities of frozen droplets gradually increase with the increase of surface contact angle. It is also found that the surface characteristics can significantly affect the removal of frozen water droplets in bigger size and longer freezing time. In addition, compared with the ordinary aluminum surface, the frozen water droplets on cold surface with surface contact angle of 136° can be completely removed by means of ultrasound. The experimental results provide a data support for hydrophobic surface applied in the ultrasonic anti-frost/defrosting.

**Key words:** surface characteristic, ultrasound, frozen water droplets, surface contact angle, removal probabilities

结霜现象广泛存在于制冷、低温、风力发电、航空航天等领域, 霜/冰层的存在严重影响制冷空调系统运行效率以及飞行器飞行安全. 因此, 探求有效的抑/除霜方法及其作用机制不仅具有重要的科学意义而且具有重要的工程应用价值. 目前, 国内外的研究主要集中在改变表面特性延缓冷表面结霜, 通过制备各种疏水涂层, 改变表面特性, 增加表面接触角, 抑制结霜的发生<sup>[1-7]</sup>. 此外, 部分学者<sup>[8-9]</sup>研究了外加电场对霜层生长的影响, 指出外加电场能够细化霜晶, 使得霜晶在自身重力作用下易于破碎. 另外, 文献[10]研究了机械振荡对冷表面霜层形成和冻结液滴生长的影响, 研究发现, 施加低频振荡仅能影响结霜初期冻结液滴的形貌, 却不能有效去除冷表面霜晶. 以上文献主要关注结霜生长阶段, 而对热力除霜后冷表面残

收稿日期: 2016-03-30.

基金项目: 江苏省自然科学基金青年项目(BK20150979)、江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB470009)、南京师范大学高层次人才科研启动项目(2015112XGQ0102).

通讯联系人: 李栋, 博士, 讲师, 研究方向: 多孔介质传热传质、新型抑/除霜方法. E-mail: lidong\_0307@163.com

留融霜液的研究相对较少.事实上,热泵运行是冷表面反复结霜-融霜-残留液滴冻结-再结霜的过程,热力融霜后冷表面残留融霜液的存在,会成为二次结霜的基底,从而加快二次结霜的进行,对融霜后二次冻结液滴去除方法的研究具有重要的意义.作者前期研究中发现超声波能够瞬间脱除冷表面冻结液滴<sup>[11-13]</sup>,为融霜后二次冻结液滴的去除提供了可能,但未对不同表面特性进行研究.因此,本文尝试将超声振荡与表面疏水特性相结合,探讨表面特性对超声波脱除冷表面冻结液滴的影响,分析了不同表面特性铝板表面冻结液滴粒径,液滴冻结时间对铝表面冻结液滴脱除概率的影响,为超声波结合表面特性应用于冷表面抑/除霜提供了数据支撑.

## 1 试验装置及方法

### 1.1 实验装置

图1是超声波去除铝表面冻结液滴试验装置示意图.整个试验系统由超声振荡系统、液滴冻结系统、动态图像快速采集系统、动态数据采集系统四部分组成.超声波振荡系统包括超声波发生器、超声波换能器、变幅杆探头及100 mm×100 mm×2 mm的6061型硬铝平板.为确保超声波工作频率稳定且与换能器阻抗较好匹配,试验段选择固有频率和变幅杆材质接近的6061型硬铝平板.试验中超声波为纵波,超声波换能器频率为20 kHz,功率在0~1 800 W内可调.动态图像快速采集系统包括高速摄像机、LED冷光源、Nikon广角镜头以及图像采集上位机.高速摄像机配合Nikon广角镜头,通过视频电缆将拍摄的图像传输到计算机中,由图像采集卡记录试验过程.试验片采用不同表面特性的100 mm×100 mm×2 mm的6061型硬铝平板,分别在其两侧靠近表面处钻有三个直径0.8 mm,深度15 mm的小孔,均匀布置六根直径为0.127 mm的OMEGA热电偶(K型)测量冷表面温度.本实验中,液滴冻结过程中每10 s采集一次温度数据,超声波作用瞬间每0.2 s记录一次温度数据.

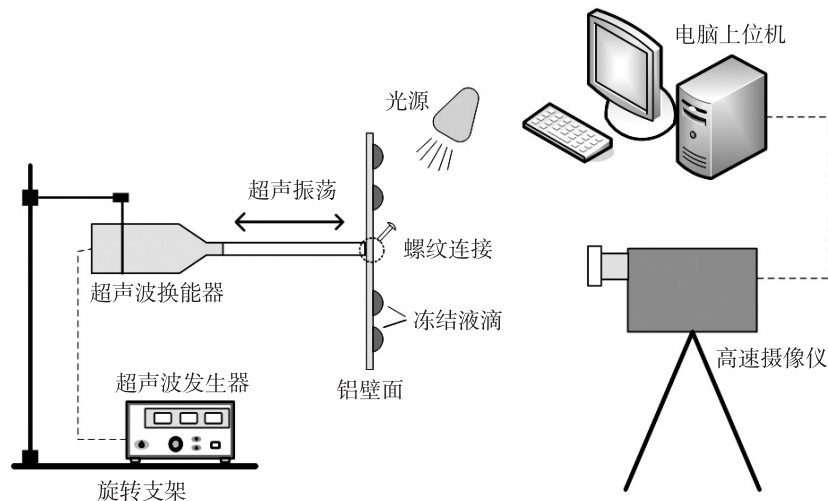


图1 冷表面冻结液滴脱落可视化系统

Fig.1 Visualization system of frozen water droplets shedding from cold surface

### 1.2 不同表面特性铝板的制备与表征

采用纳米颗粒试剂与环氧树脂固化剂以10:1的比例混合喷涂于铝基表面,经高温干燥固化,成功制备了表面静态接触角分别为87°、110°、136°的铝平板疏水表面并对其表面静态接触角进行了有效表征,如图2所示.

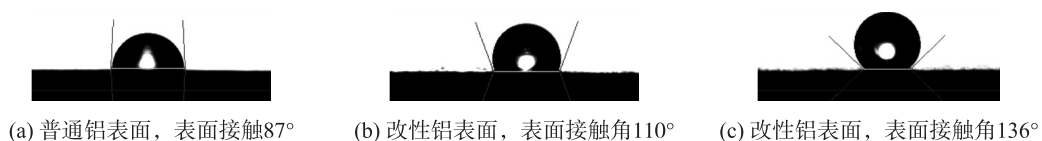


图2 表面改性后铝表面静态接触角

Fig.2 Static contact angle on aluminum surface after modification

### 1.3 试验方法

为便于量化表面特性对超声波脱除冷表面冻结液滴的影响,对铝板表面进行了网格划分,如图3所示.试验前,首先将紧固铝平板的超声波探头放置于冰箱营造的冷环境中,并保持铝表面水平(图4(a)).随后,采用移液器模拟不同规格的液滴滴定于铝平板网格中心处,如图4(b)所示.关闭冰箱门,设定冰箱温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图4(c)).待液滴冻结并和冷表面完全黏结后,开启超声波,进行脱除试验(图4(d)).试验中超声作用时间为1 s.

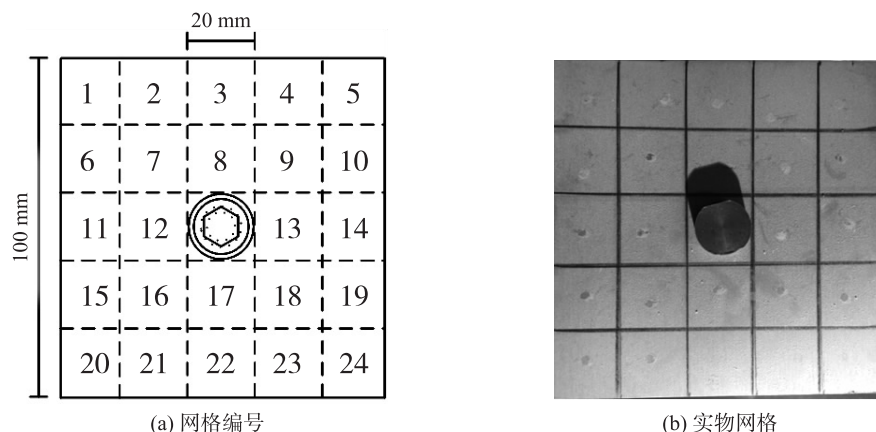


图3 铝平板表面网格划分

Fig.3 Mesh division of aluminum plate surface

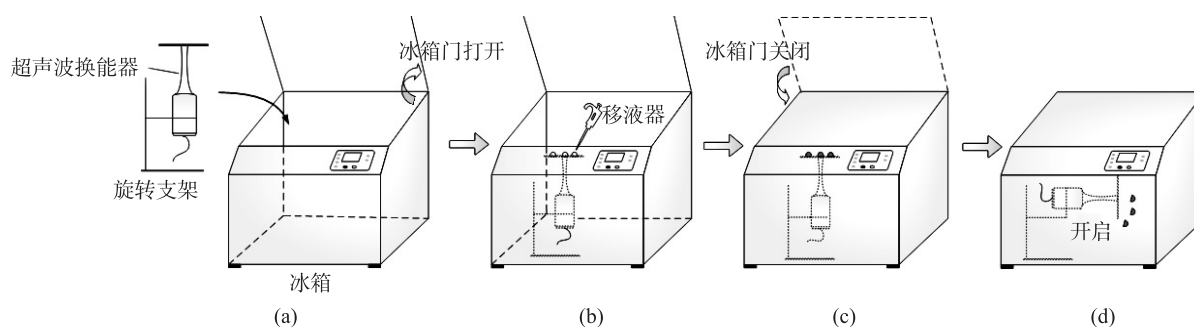


图4 液滴冻结过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of the process of water droplets freezing

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 超声波脱除冷表面冻结液滴的动态行为

图5给出了超声波脱除冷表面冻结液滴的动态过程.其中高频摄像机采集频率为3 000 帧/s,整个试验过程持续67 ms.

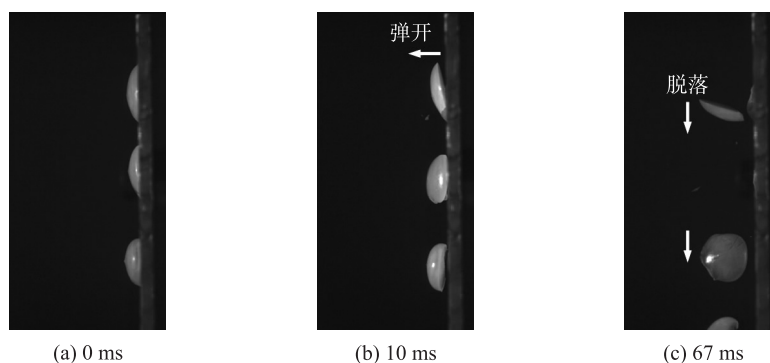


图5 超声波瞬间脱除冷表面冻结液滴动态行为

Fig.5 Dynamic behavior of frozen water droplets shedding from cold surface by ultrasound

## 2.2 表面特性对超声波脱除冷表面冻结液滴的影响

为探究表面特性对超声波脱除冷表面冻结液滴的影响,对普通表面以及表面接触角为  $110^\circ$  和  $136^\circ$  的疏水表面上冻结液滴的脱除规律进行了对比分析.图 6 给出了超声作用前后不同表面特性铝表面上冻结液滴脱除效果对比,其中超声输入功率 18 W,液滴冻结时间 60 min,冻结液滴粒径 5 mm.从图中可以看出,对于普通铝表面,如图 6(a)所示,超声作用后,冻结液滴仅有部分脱落,且脱落的冻结液滴也并未完全去除,仍有少许冰晶残留在平板表面.随着铝板表面接触角的增加,超声波对其冷表面上冻结液滴的脱除效果越发明显,如图 6(b)所示.表面接触角  $136^\circ$  时,同样实验条件下,冷表面粘附冻结液滴可彻底去除,且无微小冰晶残留.这是因为,铝板表面接触角越大,疏水性能越好,相同体积冻结液滴与铝表面的接触面积越小,使得平板-冻结液滴界面粘附力显著减小,超声波产生的界面剪切力可有效克服界面粘结力,使得冻结液滴脱除.因此,改变铝板表面特性,提高表面接触角,有利于超声波作用下冷表面冻结液滴的脱除.

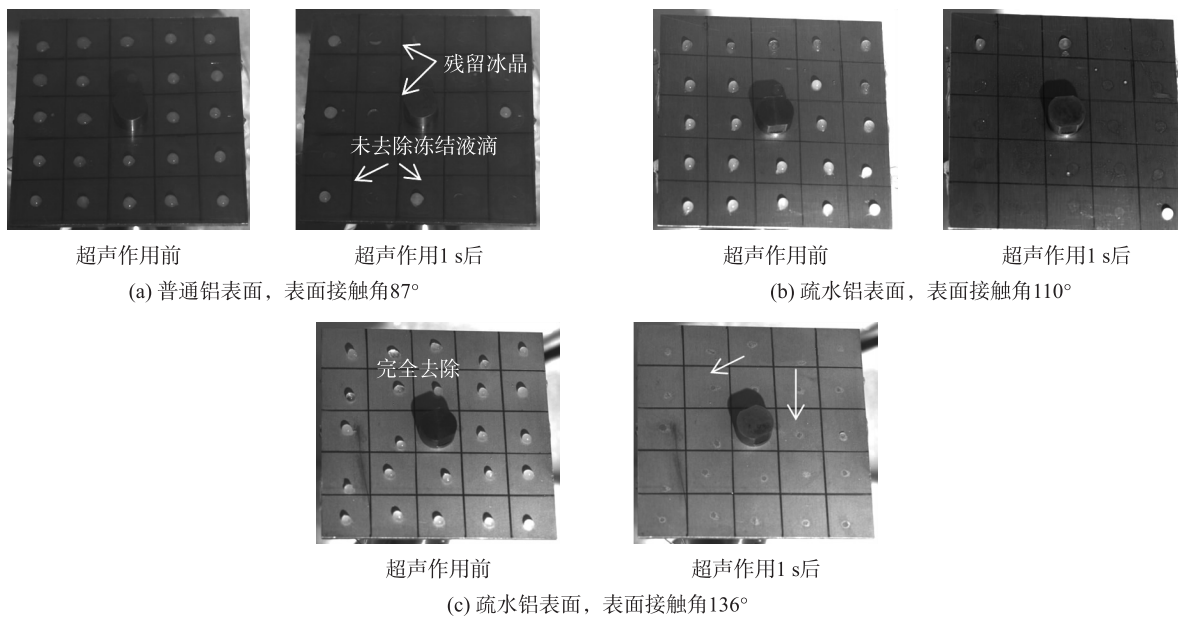


图 6 超声波对不同特性冷表面冻结液滴脱除效果

Fig.6 Effects of ultrasound on frozen droplets removal from cold surfaces with different characteristics

## 2.3 表面特性对超声波脱除不同粒径冻结液滴的影响

图 7 给出了表面接触角  $87^\circ$  以及  $136^\circ$  表面上超声作用前后不同粒径冻结液滴脱除效果对比图,其中超声输入功率 18 W,冻结时间 30 min,冻结液滴粒径分别为 5 mm、10 mm、15 mm.从图中可以看出,普通铝板上,超声作用后,随着冻结液滴粒径增大,脱除概率显著减小,液滴粒径 15 mm 时,超声波作用几乎不能脱除冻结液滴,如图 7(3-a)所示.这是因为,冻结液滴粒径越大,界面粘结力相应增加,超声作用产生的剪切力无法有效克服冻结液滴的界面粘结力,使得冻结液滴无法有效脱除.当表面接触角增加到  $136^\circ$  时,超声波作用下,不同粒径冻结液滴均能彻底脱除,且随着冻结液滴直径的增加,疏水表面对超声波脱除冷表面冻结液滴的脱除效果越显著,如图 7(3-b)所示.这是因为,随着冻结液滴直径的增加,疏水特性可显著减小冻结液滴的界面粘结力,使得界面粘结力在超声作用时足以有效克服.

为量化表面特性对冻结液滴脱除的影响规律,对不同表面特性表面上不同粒径冻结液滴的脱除概率进行了分析.图 8 给出了不同表面特性对超声作用下表面上不同粒径冻结液滴的脱除概率.由图可知,随着表面接触角的增加,不同粒径的冻结液滴脱除概率总体呈上升趋势.以粒径为 10 mm 的冻结液滴为例,表面接触角为  $87^\circ$  时,冷表面冻结液滴脱除概率仅为 16.7%,当表面接触角增加到  $110^\circ$  时,表面冻结液滴脱除概率达到 95.8%,比普通铝表面脱除概率增加了 79.1%.此外,表面特性对大粒径冻结液滴脱除的效果明显优于小粒径的冻结液滴.对于 5 mm 冻结液滴,与普通表面相比,表面接触角  $136^\circ$  时,冻结液滴的脱除概率增加 12.5%,而对于 15 mm 冻结液滴而言,表面接触角增加到  $136^\circ$  时,冻结液滴的脱除概率增加达 95.8%.结合图 7 和图 8 可以看出,当表面接触角达到  $136^\circ$  时,试验中不同粒径的冻结液滴脱除概率均可达到 100%,冻结液滴完全去除.



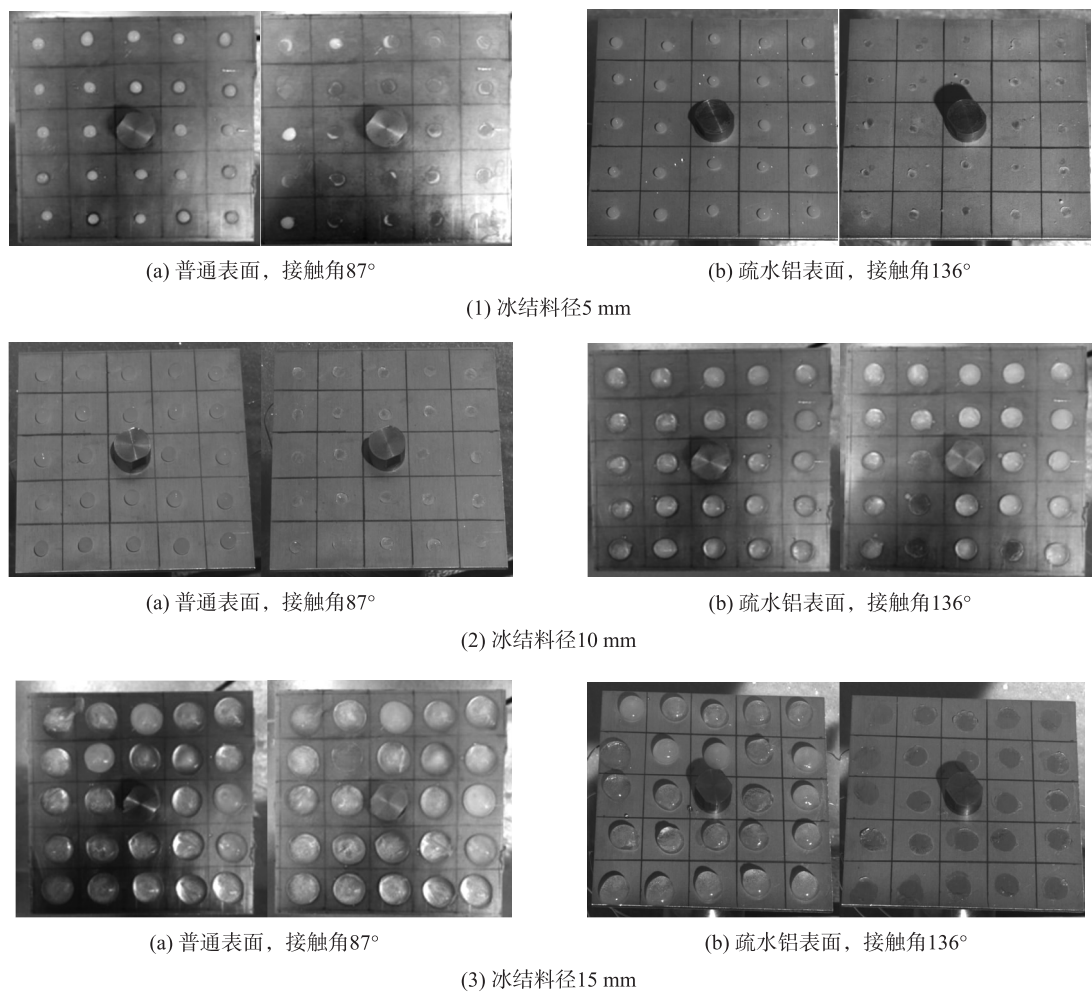


图 7 不同表面特性下超声波脱除不同粒径冻结液滴效果对比

Fig.7 Frozen water droplets with different diameter removal from cold flat with different surface characteristic by ultrasound

2.4 表面特性对不同冻结时间冻结液滴的影响

除了冻结粒径大小,液滴的冻结时间也是影响超声波脱除冻结液滴效果的重要因素.图 9 给出了冻结时间分别为 30 min 和 60 min 时,不同接触角表面上不同冻结时间的冻结液滴的脱除概率,其中超声输入功率为 18 W,冻结液滴粒径 5 mm.由图可以看出,同一铝表面上,随着液滴冻结时间的增加,平板-冻结液滴界面粘结力显著增加,冻结液滴较难脱除,不同表面特性下的冻结液滴脱除概率均变小.然而,当冻结时间相同时,铝表面接触角的增大可有效增加超声波脱除冻结液滴的脱除概率.冻结时间 60 min 时,表面接触角为 87°的冷表面上冻结液滴的脱除概率为 79%,当表面接触角增加到 110°时,表面冻结液滴脱除概率为 95.8%,比普通铝表面脱除概率增加了 16.8%,当表面接触角继续增加,达到 136°时,由于平板-冻结液滴的接触面积变小,界面粘结力显著降低,冻结液滴完全去除,表面冻结液滴脱除概率可达 100%.

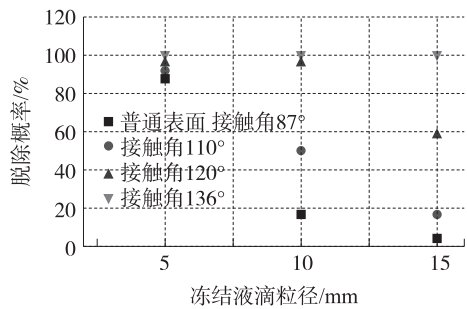


图 8 不同表面特性下不同粒径的冻结液滴的脱除概率

Fig.8 Removal probabilities of frozen droplets in different size on cold surfaces with different characteristics

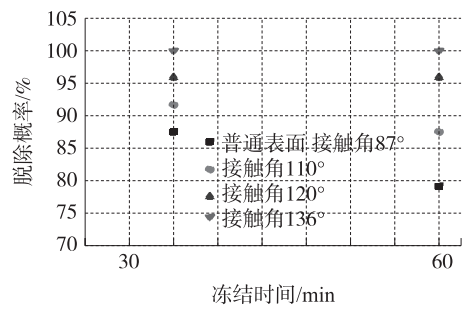


图 9 不同表面特性不同冻结时间下冻结液滴的脱除概率

Fig.9 Removal probabilities of frozen droplets in different frozen time on cold surfaces with different characteristics

### 3 结语

对表面特性对超声波脱除冷表面冻结液滴的影响进行了试验研究,分别制备了表面接触角为  $87^\circ$ 、 $110^\circ$  以及  $136^\circ$  的铝表面,并对不同冻结液滴粒径以及不同冻结时间条件下,不同表面特性对超声波脱除冻结液滴的影响进行了对比分析. 研究试验结果表明:疏水表面特性有助于超声波对冷表面冻结液滴的脱除,且随着表面接触角的进一步增大,冷表面冻结液滴脱除概率持续增加;5 mm~15 mm 的冻结液滴粒径范围内,冻结液滴粒径越大,表面特性对超声脱除冷表面冻结液滴的效果越显著;30 min~60 min 的冻结时间内,铝表面接触角的增大可有效增加超声波脱除冻结液滴的脱除概率. 试验发现,表面接触角达到  $136^\circ$  时,试验中不同粒径以及不同冻结时间的冻结液滴脱除概率均可达到 100%. 研究结果为超声波结合疏水表面抑霜/除霜提供了依据.

### [参考文献](References)

- [1] DIB A, HAIAHEM A, BOU-SAID B. Superhydrophobic nanocomposite surface topography and ice adhesion[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6(12): 9 272–9 279.
- [2] LUDMIL A B, EMELIANENKO A M. Role of water vapor desublimation in the adhesion of an iced droplet to a superhydrophobic surface[J]. Langmuir, 2014, 16(2): 12 596–12 601.
- [3] QIAN X, JUAN L, JIAN T, et al. Energy-effective frost-free coatings based on superhydrophobic aligned nanocones[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6(12): 8 976–8 980.
- [4] QUANYONG H, YICHUAN P, YING Z, et al. Mechanism of delayed frost growth on superhydrophobic surfaces with jumping condensates: more than interdrop freezing[J]. Langmuir, 2014, 30(51): 15 416–15 422.
- [5] BOREYKO J B, SRIJANTO B R, TRUNG DAC N, et al. Dynamic defrosting on nanostructured superhydrophobic surfaces[J]. Langmuir, 2013, 29(30): 9 516–9 524.
- [6] KIM K, LEE K S. Frosting and defrosting characteristics of a fin according to surface contact angle[J]. International journal of heat mass transfer, 2011, 54(13): 2 758–2 764.
- [7] STEFAN J, MARKO D, DOMINIK R, et al. Are superhydrophobic surfaces best for icephobicity?[J]. Langmuir, 2011, 27(6): 3 059–3 066.
- [8] WANG C C, HUANG R T, SHEU W J, et al. Some observations of the frost formation in free convection: with and without the presence of electric field[J]. International journal of heat & mass transfer, 2004, 47(s14/15/16): 3 491–3 505.
- [9] JOPPOLO C M, MOLINAROLI L, ANTONELLIS S D, et al. Experimental analysis of frost formation with the presence of an electric field on fin and tube evaporator[J]. International journal of refrigeration, 2012, 35(2): 468–474.
- [10] CHENG C H, SHIU C C. Oscillation effects on frost formation and liquid droplet solidification on a cold plate in atmospheric air flow[J]. International journal of refrigeration, 2003, 26(2): 69–78.
- [11] LI D, CHEN Z, SHI M. Effect of ultrasound on frost formation on a cold flat surface in atmospheric air flow[J]. Experimental thermal & fluid science, 2010, 34(34): 1 247–1 252.
- [12] 李栋, 陈振乾. 超声波瞬间脱除冷表面冻结液滴的试验研究[J]. 化工学报, 2013, 64(8): 2 730–2 735.  
LI D, CHEN Z Q. Instantaneous removal of frozen water droplets from cold surface by means of ultrasonic vibration[J]. CIESC journal, 2013, 64(8): 2 730–2 735. (in Chinese)
- [13] 李栋, 陈振乾. 超声功率对冷壁面冻结液滴脱除效果的影响[J]. 东南大学学报, 2014, 44(4): 751–755.  
LI D, CHEN Z Q. Effects of ultrasonic power on frozen water droplets removal from cold surface[J]. Journal of southeast university, 2014, 44(4): 751–755. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]