

基于综合工况的汽车空调除霜性能设计优化

张志，鲁韦江

长安汽车阿维塔科技有限公司

【摘要】 车辆实际行驶过程中常在前风窗玻璃及侧窗玻璃表面产生结霜、结雾现象，会对驾驶人的安全性和舒适性造成影响。本文对于这些现象进行分类分析，找出不同现象产生的机理，在目前现有的法规除霜、除雾试验方法的基础上增加更贴近用户实际使用工况的综合工况除霜试验方法。依据不同试验方法制定在除霜出风系统设计阶段相对应的仿真计算工作流程，设计阶段的迭代和优化会输出最终设计状态的方案，然后进行快速样件制作完成除霜试验。本次研究能够为今后除霜系统的设计工作提供方法，同时分析影响除霜效果的关键因素，为空调系统除霜及采暖等关联性能的设计和平衡提供指导。

【关键词】 汽车空调，除霜，综合工况，仿真计算，试验测试

Design Optimization of Automobile Defrosting Performance Based on Comprehensive Working Conditions

Zhang Zhi, Lu Weijiang

Changan Automobile AVATR Co., Ltd.

Abstract: During the actual driving of the vehicle, frost and fog often occur on the surface of the front windshield and side window glass, which will affect the safety and comfort of the driver. This paper classifies and analyzes these phenomena, finds out the mechanism of different phenomena, and adds a comprehensive working condition defrosting test method that is closer to the actual working conditions of users on the basis of the existing legal defrosting and defogging test methods. According to different test methods, the corresponding simulation calculation workflow in the design stage of the defrost air outlet system is formulated. The iteration and optimization of the design stage will output the final design state scheme, and then a quick prototype is produced to complete the defrost test. This research can provide a method for the design of the defrosting system in the future, and at the same time analyze the key factors affecting the defrosting effect, and provide guidance for the design and balance of the defrosting and heating related performance of the air-conditioning system.

Key words: automotive air conditioning, defrost, comprehensive working conditions, simulation, test

引言

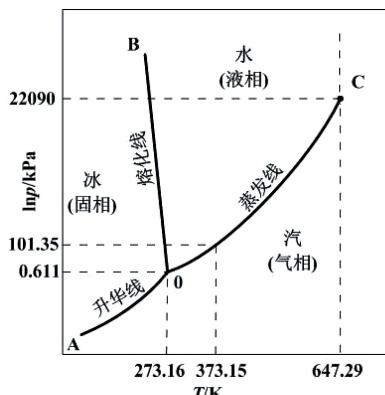
汽车风窗玻璃表面在特定的条件下会附着霜雾，按照霜层附着的位置可分为玻璃外侧结霜和内侧结霜两种情况，外侧结霜常发生在冬季寒冷气候下户外停车，内侧结霜常发生在冬季寒冷气候乘坐人员较多导致车内空气相对湿度大的情况。按照雾气附着的位置可分为玻璃外侧结雾和内侧结雾两种情况，外侧结雾常发生在夏季雨天开空调制冷的情况，内侧结雾常发生在潮湿的春秋季。机动车辆风窗玻璃附着霜雾后，如果没有及时有效处理，将对乘车人员的驾驶安全性和乘坐舒适性造成很大的威胁，因此在车辆设计开发阶段空调系统需要重点关注除霜除雾及抑制结霜结雾的性能。除霜除雾性能作为空调系统开发的目标之一，在国标 GB 11555—2009《汽车风窗玻璃除霜和除雾系统的性能和试验方法》有相关的要求，国标除霜试验针对前风窗玻璃外侧结霜，要求试验开始 20min 时至少应将 A 区 80% 面积的霜除尽，试验开始 25min 时至少应将 A' 区 80% 面积的霜除尽，试验开始 40min 时至少应将 B 区 95% 面积的霜除尽；国标除雾试验针对前风窗玻璃内侧结雾，要求试验开始 10min 时至少应将 A 区 90% 和 B 区 80% 面积的雾除尽。对于风窗玻璃内侧结霜和外侧结雾的情况目前还没有具体的法规要求。

本文分析的重点是车辆行驶过程中玻璃内表面防止返霜和风窗玻璃内表面除霜性能。玻璃内表面返霜现象常发生在环境温度低、车速较高的情况，如北方冬天高速长时间行驶，用户常使用吹脚模式或者吹脚除霜模式且风量常为中小风量，表现为噪声较小、舒适性较好，这个时候如果有返霜现象发生，会影响客户的驾驶体验。空调除霜模式常用在开始阶段有霜的情况下，能够快速去除霜层，但同时常表现为噪声大、舒适性差，这个模式作为特殊情况使用。

1 研究方法

霜雾形成过程是一个具有移动边界，变物性涉及气液、液固或气固相变的非常复杂的传热传质过程。按照结霜产生的过程可以分为两种：气液固相变结霜和气固凝华结霜，前者在玻璃内、外表面都可能发生，后者常在汽车外玻璃发生。水的三相点温度为 273.16K，如图 1 所示，国内有学者提出把冷壁面温度低于水蒸气分压力所对应的气固或液固相变温度作为结霜的判断依据。

汽车风窗玻璃常见的除霜方法有热气除霜、电加热丝除霜，燃油车空调系统的除霜功能是利用发动机工作余热将加热后的冷却液通过水泵送到暖风芯体，鼓风机将从暖通空调（Heating, Ventilation, and Air Conditioning, HVAC）吸入的冷风经过暖风芯体吸收高温冷却液的热量被加热为热风，后

图 1 水 p - T 相图

经过除霜出风系统送到风窗玻璃内表面进行除霜，大致工作原理图如图 2 所示。影响玻璃内表面除霜及预防返霜的因素有气流流场、冷却液温度温升、HVAC 风量、玻璃材料属性、乘员舱的通风性能以及环境温湿度、行驶车速等因素。

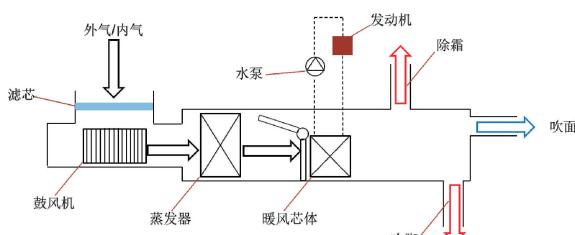


图 2 空调除霜工作原理

空调除霜出风系统由风道、风口、出风叶片组成，主要作用是保证除霜气流流场的要求，影响除霜气流流场的因素有出风口气流速度、方向、流动组织，从系统性能要求而言，除霜出风口大小、风道出风导向段尺寸、出风口中心线与前风窗玻璃的夹角、出风口中心到冲击点的距离等都是影响除霜流场的重要因素。目前对于除霜出风系统的设计需要利用计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）流场计算进行数据校核和优化，仿真计算大致分为以下几个阶段：HVAC 箱体和除霜风道仿真计算、HVAC 箱体带上风道仿真计算、除霜风道加乘员舱仿真计算、除霜风道加乘员舱同时结合车辆外流场的仿真计算，如图 3 所示。基于 HVAC 箱体除霜风口计算结果的风速分布矩阵输出到整车模型中作为计算的边界条件，可以减小不带 HVAC 箱体带来整车除霜仿真计算的偏差。

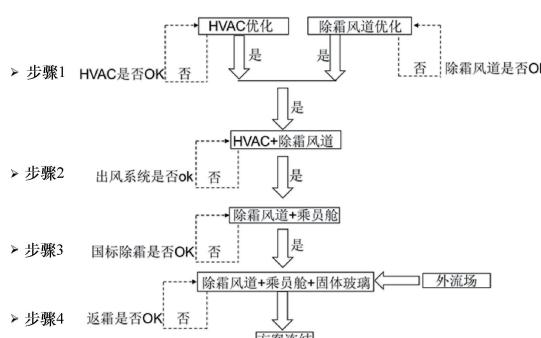


图 3 仿真工作流程图

2 仿真工作介绍

2.1 稳态计算

对于除霜风道单体的性能要求见表 1，本文从除霜风道加乘员舱仿真开始介绍。仿真模型给定空气为理想气体，湍流模型为 Realizable k-epsilon two layer，壁面处理模型为 All y+wall treatment，入口风量为 $323\text{m}^3/\text{h}$ ，出口为压力出口，其他边界为壁面边界。玻璃边界层网格总厚度 3mm，增长率 1.1，总层数为 5 层。

表 1 除霜风道的性能要求

位置	驾驶人侧除霜	前除霜	前排乘客侧除霜
风量配比	$10\% \pm 2\%$	$80\% \pm 5\%$	$10\% \pm 2\%$
总压压降	$< 100\text{Pa} @ 350\text{m}^3/\text{h}$		
平均风速	$5 \sim 8\text{m/s}$		

稳态仿真计算结果显示原方案前除霜配比偏小且前除霜出风风速均匀性不佳，无法有效地把风导向前风窗玻璃视野区；侧除霜能够覆盖左右侧玻璃视野区，存在的问题为侧除霜气流配比偏大且存在除霜气流被导向玻璃边缘及前部尖角等非有效区域的问题，如图 4 所示。

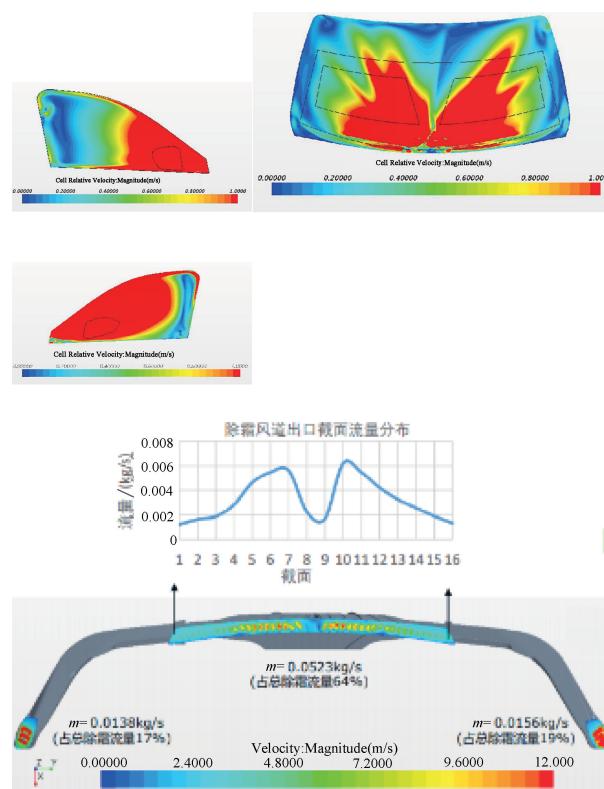


图 4 原方案仿真计算结果

针对以上问题，对前除霜风道左右两侧导向叶片的形状进行优化，改善前除霜和侧除霜风量配比，对前除霜风道中间导向叶片的形状进行优化改善出风均匀性，如图 5 所示。侧除霜由于风量降低，高流速覆盖轮廓相比原方案有所缩小，通过优化侧除霜风道的走向来优化侧除霜的出风方向，同时优化格栅冲击点位置和角度。

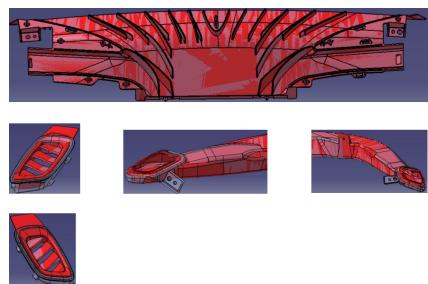


图 5 除霜风道优化说明

注：红色为原方案，白色为优化方案。

按照优化方案进行稳态仿真计算，计算结果如图 6 所示，前风窗玻璃、侧窗玻璃视野区表面风速覆盖率有明显提升，按照过往项目的仿真结果与试验结果对比，认为优化方案能够满足国标法规除霜性能要求。

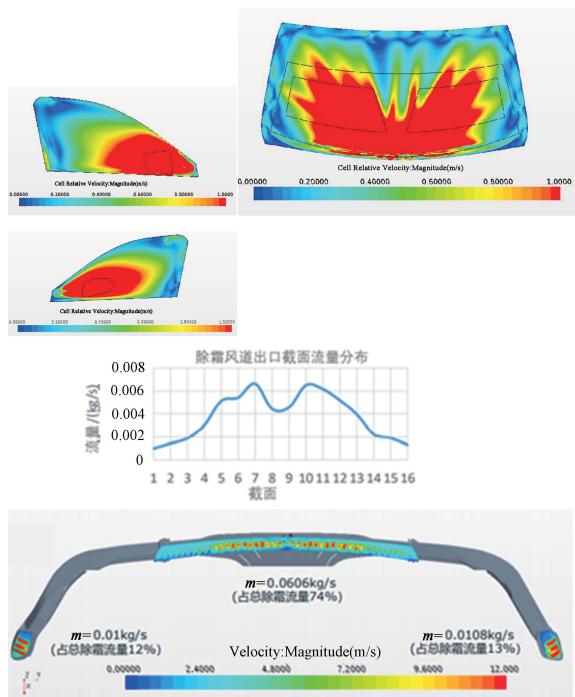


图 6 优化方案仿真计算结果

2.2 综合工况瞬态计算

本文所述的开发车型为七座运动型多功能汽车 (Sport Utility Vehicle, SUV)、配置前、后双空调，整车开发性能关注玻璃内表面的除霜以及车辆行驶过程中玻璃内表面防止返霜性能，为了更接近用户实际使用工况，企业制定了综合工况除霜性能方法，见表 2，试验环境温度为 -20℃。根据台架风量测试结果，前空调鼓风机标准电压 12V 除霜模式风量为 $323\text{m}^3/\text{h}$ 、吹脚模式风量为 $329\text{m}^3/\text{h}$ ，后空调鼓风机标准电压 12V，吹脚模式标准风量为 $145\text{m}^3/\text{h}$ 。

表 2 综合工况除霜性能方法

工况条件	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
时间/min	0~7	7~20	20~50	50~65
车速/(km/h)	40		100	

(续)

工况条件	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
前空调模式	除霜	吹脚除霜	吹脚除霜	吹脚
后空调模式				吹脚
风量挡位	Max		3/4 挡	2/4 挡

综合工况除霜分析模型主要包含流体域：乘员舱，除霜风道，吹面风道，前、中、后吹脚风道；固体域：前风窗玻璃，第一、二、三排侧玻璃，后玻璃。整个计算域的入口为各风道入口，出口为乘员舱泄压口位置及后空调进风口，如图 7 所示。

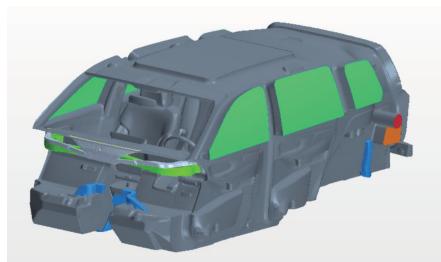


图 7 瞬态仿真模型

空气的物性参数有动黏度、摩尔质量、比热、热导率，冰层的物性参数有密度、潜热、相变温度、比热，玻璃的物性参数有密度、比热、热导率，玻璃按照前风窗玻璃、侧窗玻璃、后风窗玻璃考虑，同时按照试验方法，后风窗玻璃根据电加热丝的功率给定热源。仿真计算中按照综合工况除霜性能方法的人员呼吸湿空气量转变成玻璃的霜层厚度，除霜风口、吹脚风口按照平台车型的试验数据作为瞬态仿真的计算条件，如图 8 所示。

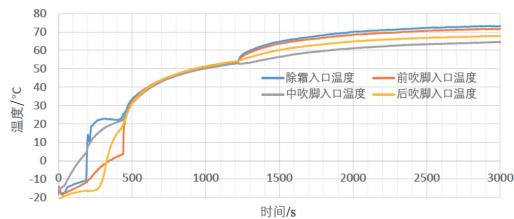


图 8 风口温度曲线

返霜很大程度上受车速带来的玻璃外表面对流换热的影响，通过外流场计算得到玻璃表面的对流换热系数，可以极大提高除霜的计算精度。外流场计算域基本尺寸为车前 3 倍车长、车后 7 倍车长、宽度为 4 倍车宽、高度为 5 倍车高，如图 9 所示。计算工况按照车速 40km/h、100km/h 两个工况，边界条件给定速度入口、压力出口。

车辆外流场仿真计算结果如图 10、图 11 所示，车辆行驶工况下外气流先经过前保险杠，经过驻点后气流被加速流向发动机舱盖，然后流向前风窗玻璃形成一个阻滞区，前风窗玻璃的下部气流流速低，上部气流流速高，然后又重新加速，经过车顶流到后窗上部开始减速，产生分流分离。流向前后风窗玻璃两侧的气流经过 A 柱会流向侧风窗玻璃，第一排侧风窗玻璃表面从后视镜斜向上会出现高流速的区域。

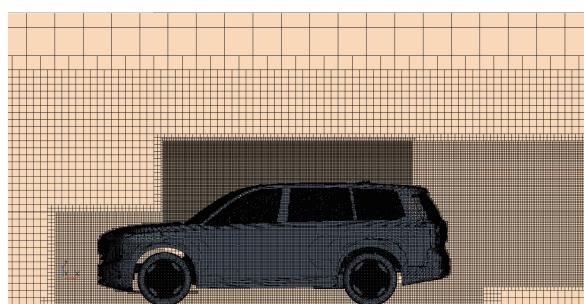


图 9 车辆外流场模型

由对流传热牛顿冷却定律可知

$$q = h(T_s - T_{ref})$$

式中, q 是局部表面热通量 (W/m^2); h 是局部对流换热系数 [$(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$]; T_s 是表面温度 ($^\circ\text{C}$); T_{ref} 是表面上流动的流体的特征温度 ($^\circ\text{C}$)。

行驶工况下外流场流动条件存在空间和时间的变化, 按

照玻璃表面的面积平均给出玻璃外表面的平均风速和对流换热系数可以作为今后定性分析的参考, 统计参数见表 3。

表 3 玻璃外表面平均值

车速	物理量	前风窗	第一排侧风窗
40km/h	近玻璃表面平均流速/(m/s)	7.2	8.7
	局部对流换热系数/[W/(m ² · K)]	132	137
100km/h	近玻璃表面平均流速/(m/s)	18.6	22.2
	局部对流换热系数/[W/(m ² · K)]	182	196

将外流场在车速为 40km/h、100km/h 时前风窗玻璃、第一排两侧玻璃外表面的对流换热系数结果通过边界插值的方式映射到玻璃固体域, 作为乘员舱内流场模型仿真计算的输入边界条件, 进行综合工况的瞬态仿真计算。原方案和优化方案的计算结果分别如图 12、如图 13 所示, 通过仿真计算判断基本满足企业内部预推行的综合工况除霜性能要求。

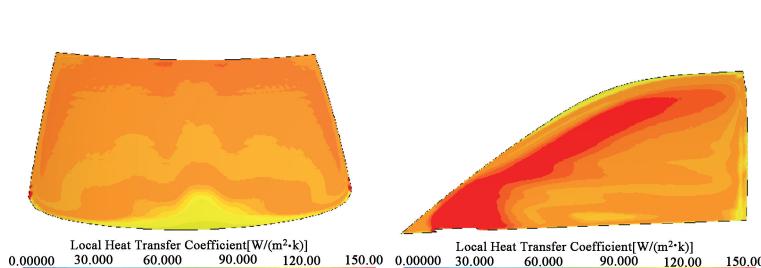


图 10 车辆外流场结果 (40km/h)

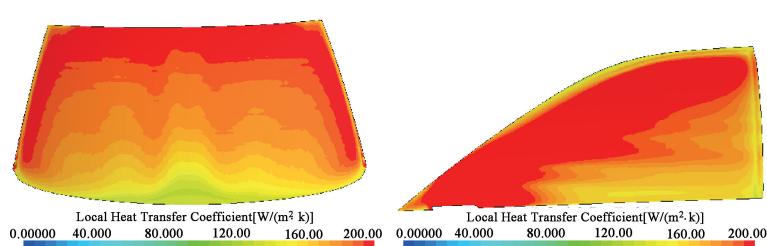
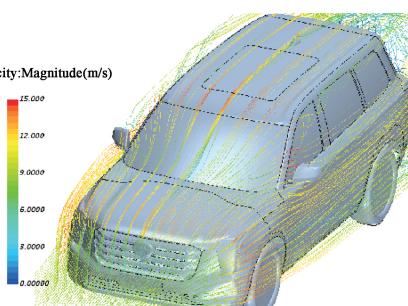


图 11 车辆外流场结果 (100km/h)

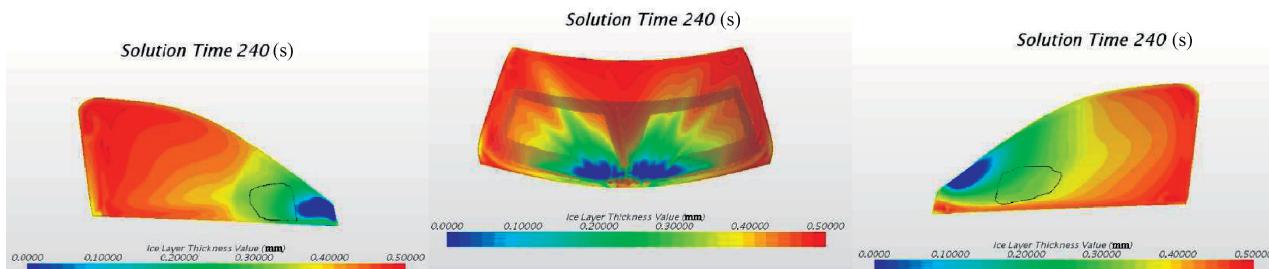
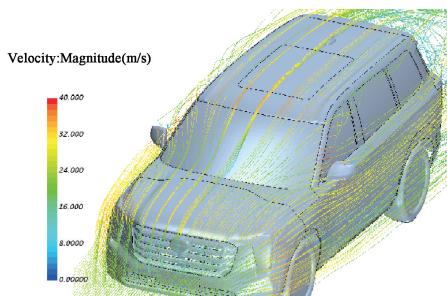


图 12 原方案综合工况瞬态计算结果

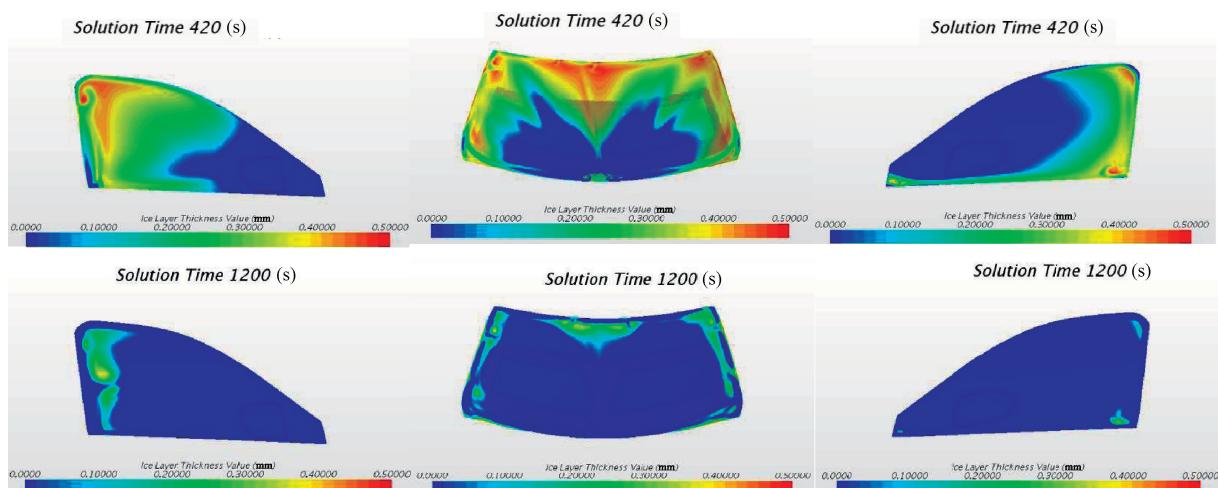


图 12 原方案综合工况瞬态计算结果 (续)

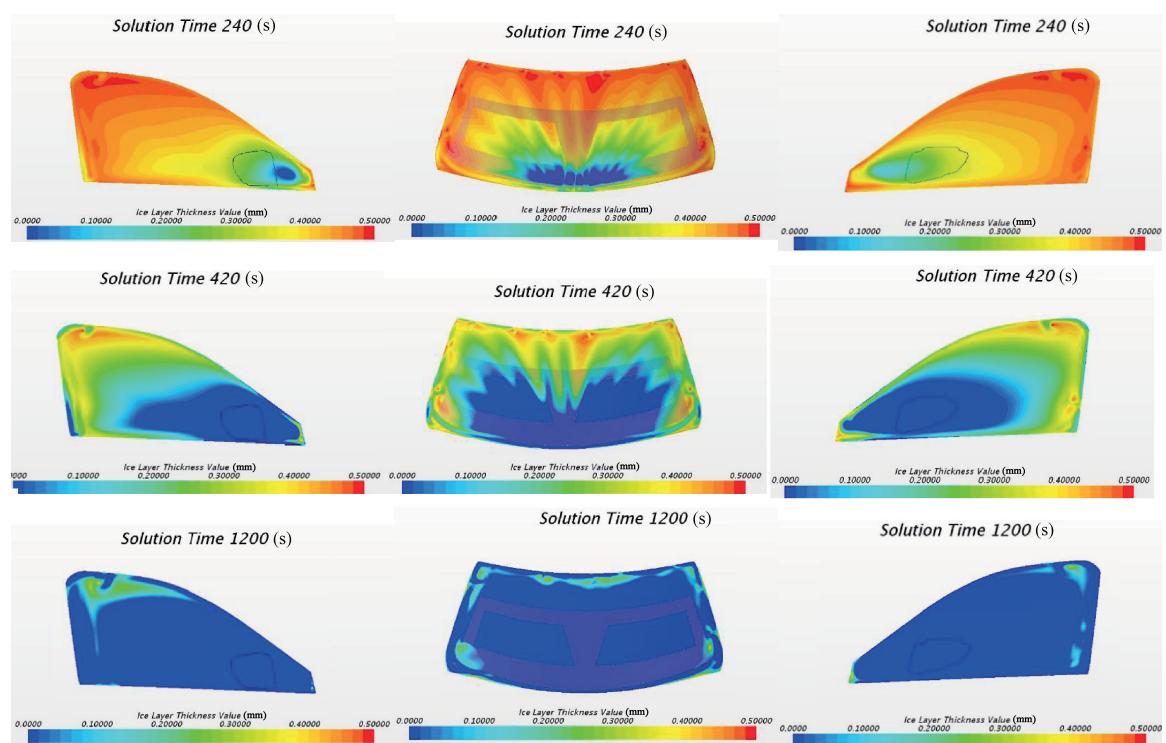


图 13 优化方案综合工况瞬态计算结果

3 除霜试验结果

根据仿真计算输出的优化方案进行样件制作及装车试验验证，除霜性能试验包括国标法规试验和企标综合工况的除霜试验。按照法规除霜试验方法进行测试，法规除霜结果见图 14 和表 4，试验结果为符合，说明按照仿真优化后的除霜风道方案能够满足法规除霜的性能要求。

表 4 除霜法规试验结果

标准要求	检验结果	符合性判定
试验开始后 20min, A 区 80%以上除霜	试验开始后 20min, A 区 97.2%除霜	符合

标准要求	检验结果	符合性判定
试验开始后 25min, A' 区 80%以上除霜	试验开始后 25min, A' 区 100%除霜	符合
试验开始后 40min, B 区 95%以上除霜	试验开始后 40min, B 区 100%除霜	符合

按照综合工况下除霜性能试验方法，对仿真优化后的除霜风道进行测试验证，当前企标对于综合工况的除霜性能标准见表 5。

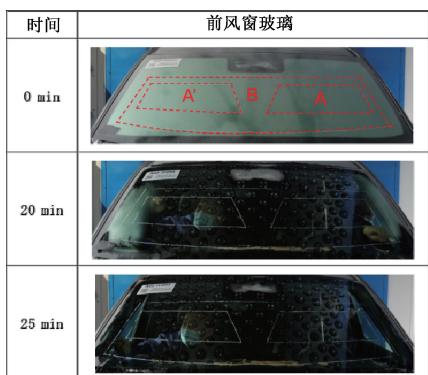


图 14 除霜法规试验结果

表 6 综合工况除霜试验结果

位置	7min	20min	50min	65min
前风窗玻璃	视野到达行驶区且驾驶人侧除去面积>前排乘客侧	刮水器区域 90%以上除干净且刮水器区内 B 区 90%除完	刮水器区域 95%以上除干净且刮水器区内 B 区 95%除完	刮水器区域 96.2%, 行驶区刮水器区内 B 区 98.1%
驾驶人侧窗	S 区		58.4%	78.2%
前排乘客侧窗	S 区		57.2%	95.7%

表 5 综合工况除霜试验标准

位置	7min	20min	50min	65min
前风窗玻璃	视野到达行驶区且驾驶人侧除去面积>前排乘客侧	刮水器区域 90%以上除干净且刮水器区内 B 区 90%除完	刮水器区域 95%以上除干净且刮水器区内 B 区 95%除完	与 20min 判定标准一致
侧窗	S 区除完	侧窗区域 80%除完	侧窗区域 90%除完	

综合工况除霜性能结果见图 15 和表 6, 试验结果为前风窗玻璃符合标准要求, 驾驶人侧窗玻璃在 20min、50min 两个时间点, 前排乘客侧窗玻璃在 20min 时间点与标准要求存在一定差异, 其余时间点符合标准要求。

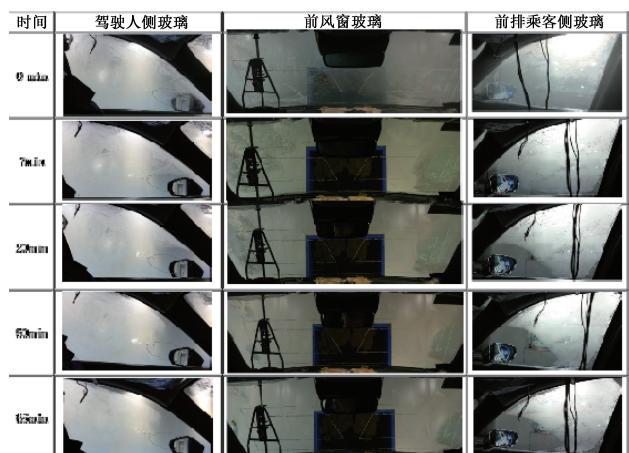


图 15 综合工况除霜试验结果

4 结论

空调除霜性能主要有两方面的设计目标考虑, 最大除霜性能和综合工况的除霜性能, 其中最大除霜能力与 HVAC 箱体除霜模式的风量、玻璃近壁面的流速分布、暖风芯体冷却液侧的温升速率相关。这个性能作为国标法规项是有要求的。除此基本要求外, 在用户实际使用车辆的工况下, 例如吹脚除霜模式、吹脚模式及常用风量等情况下需要重点关注预防返霜现象的发生。本文通过仿真计算对综合工况除霜性能进行分析, 说明仿真计算可以为除霜结构设计阶段提供指导, 同时也发现侧窗玻璃仿真结果与试验结果存在一定差异, 需要在后续仿真工作中持续优化。通过对防止返霜发生的关键物理量进行分析可以总结出如下几条设计经验。

1) 空调设计应兼顾除霜性能和采暖舒适度, 保证良好的温度分区以便长时间驾驶。例如在寒冷的北方, 吹脚除霜作为长时间驾驶经常使用的模式, 既要保证舒适度需求, 又要满足除霜安全需求。

2) 用户常用风量为中小风量, 玻璃表面在此挡位下应避免气流死区, 形成气帘阻隔湿蒸汽凝结, 这个与 HVAC 箱体吹脚除霜模式、吹脚模式下除霜风量的配比有关。

3) 除霜和采暖模式常为外循环, 良好的通风性能可减少气流涡流和雾气产生的可能性。在满足整车泄漏量目标的基础上, 增加通风率的目标, 保证气流能顺畅地通过泄压阀流出。

4) 前、后排风窗玻璃采用低热导率的玻璃, 如双层玻璃, 可以减少返霜的风险。

在车辆开发中将关键参数如风量、出风温度、玻璃材料、行驶车速、环境温湿度等指标分解到系统和零部件进行目标管控, 可以将空调系统除霜性能设计得更加合理、均衡。

参 考 文 献

- [1] 王永珍. 风窗玻璃霜雾结解过程传热及其融化特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [2] 张晓兰, 施俊业, 陈江平. 汽车挡风玻璃除霜性能数值模拟 [J]. 汽车工程, 2017, 11: 1009-1013.
- [3] 张文灿. 汽车乘坐空间热环境与乘员热舒适性分析关键技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [4] 吴晓敏, 单小丰, 王维城, 等. 冷表面结霜的微观可视化研究 [J]. 清华大学学报, 2003, 43 (10): 1437-1440.
- [5] EMERY A F, SIEGEL B L. Experimental measurements of the effects of frost formation on heat exchanger performance [C]// Proceedings of AIAA/ASME Thermophysics and Heat Transfer Conference. Seattle: AIAA, 1990, 139: 1-7.
- [6] AROUSSI A, HASSAN A, CLAYTON B R, et al. An assessment of vehicle side-window defrosting and demisting process [J]. SAE Transactions, 2001, 110 (7): 150-156.