

文章编号: 1671-6612 (2020) 05-592-05

# 乘用车空调除霜性能要求与试验方法研究

冯鸿飞<sup>1</sup> 王 坤<sup>2</sup> 李四旺<sup>1</sup>

(1.广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院 广州 511434;

2.中国第一汽车股份有限公司研发总院 长春 130011)

**【摘 要】** 针对我国北方寒冷冬季行车对空调除霜功能的需求, 讨论应用现行国标考核除霜性能的局限性。为量化环境温度对除霜效果的影响, 在验证 CFD 计算可靠性的基础上, 利用 CFD 瞬态分析得出了环境温度与整车除霜时间, 除霜面积之间的关系。综合 CFD 分析和试验结果, 对国标除霜法规中乘用车除霜性能要求和试验方法提出修改建议: 即将 A 区完成 80%所需时间由现行 20min 缩短至 15min, 并增加怠速工况除霜性能考核: 即 25min 后, A 区完成 80%。

**【关键词】** 除霜; CFD 分析; 性能要求; 试验方法

中图分类号 U461 文献标识码 A

## Study on the Performance Requirement and Testing Method in Passenger Car's Defrosting Process

Feng Hongfei<sup>1</sup> Wang Kun<sup>2</sup> Li Siwang<sup>1</sup>

(1.GAC R&D CENTER, Guangzhou, 511434; 2.FAW Research and Development, Changchun, 130011)

**【Abstract】** In view of the requirement of the defrosting function in cold northern China, the limitations of the national standard (GB) in judging the defrosting performance were discussed. In order to quantify the relationship between the ambient temperature and the defrosting effect, the relationship between the ambient temperature and the vehicle's defrosting time, defrosting area were studied based on the verification of the CFD reliability. Combination of CFD analysis and the experiment data, the GB defrosting regulations in passenger car defrosting performance requirements and test methods proposed were changed. The defrosting time of A zone with 80% completion was shortened from 20min to 15min, and the examination of idle defrosting performance that A zone finished 80% after 25 minutes was added.

**【Keywords】** defrosting; CFD analysis; performance requirements; test method

作者(通讯作者)简介: 冯鸿飞(1988.01-), 女, 本科, 工程师, E-mail: fenghongfei@gacrnd.com

收稿日期: 2019-12-16

## 0 引言

汽车空调除霜性能的好坏直接关系到整车的行驶安全<sup>[1]</sup>, 乘员舱气流的速度场和温度场的影响因素众多<sup>[2-5]</sup>, 国家法规 GB-11555 中对汽车空调除霜性能要求为: 环境温度-18℃条件下, 20min 内 A 区完成 80%; 25min 内 A'区完成 80%; 40min 内 B 区完成 95%<sup>[6]</sup>。我国幅员辽阔, 北方地区冬季环境

温度可能远低于国标中的规定值, 图 1 收集了 1980~2010 年北方四城市 1 月份日最低温度平均值, 图 2 收集了 1980~2010 年北方四城市 1 月份日湿度曲线, 从两图中可以看出, 部分地区冬季环境温度会达到-30℃及以下, 相对湿度会达到 75% 甚至更高。

如果没有除霜装置, 汽车行驶几公里后, 前风

窗玻璃就会结满霜。霜厚一般在 0.5~1mm 之间, 此时风窗会变成全盲区, 致使驾驶员无法驾驶车辆。由此可见, 除霜与汽车安全性密切相关, 如何有效除霜是一个值得深入研究的课题。

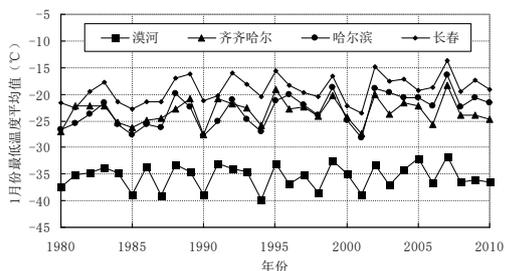


图 1 北方四城 1980~2010 年 1 月份日最低温度情况

Fig.1 Daily minimum temperature in four northern cities from 1980 to January 2010

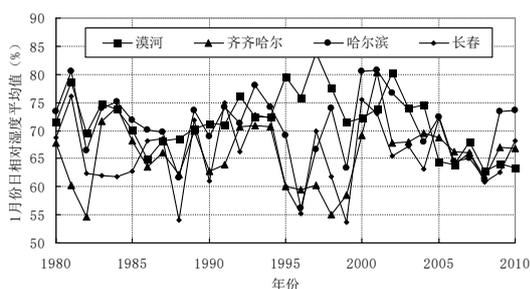


图 2 北方四城 1980~2010 年 1 月份日湿度分布情况

Fig.2 Daily humidity in four northern cities from 1980 to January 2010

为解决上述问题, 在优化乘用车空调除霜系统设计的同时需要从法规上对除霜系统的性能要求进行重新限定, 即降低除霜法规中环境温度值以适应寒区工况, 相应地需要试验室内提供更低的环境温度作为支持。考虑到获取低温工况需要的高成本, 建议在维持当前试验环境温度的条件下, 缩短除霜规定时间。另外, 考虑到冬季冷启车过程, 需增加对车辆怠速过程中除霜性能的考核。

文献[7-11]采用了 CFD 的方法车辆乘员舱进行了数值模拟和研究。将瞬态 CFD 分析应用到除霜系统的模拟计算中, 不仅能得到整个流动区域的速度、温度分布, 还能直观地表现出整个除霜的动态过程<sup>[12]</sup>。为分析环境温度对除霜效果的影响, 首先建立整车除霜瞬态 CFD 分析模型并将分析结果与现有试验数据进行对比, 以验证模型的正确性; 然后通过瞬态 CFD 计算, 分别获得环境温度-25℃、-30℃、-35℃下除霜时间及除霜效果; 最后提出对

国标除霜法规的修改建议: 将原要求中的 20min 内 A 区完成 80%, 提升至 15min 内 A 区完成 80%; 并增加怠速工况下, 25min 内, A 区完成 80%。

## 1 模型建立

### 1.1 模型描述及理论分析

在整车除霜过程中, 热空气通过供热通风与空气调节 (HVAC) 总成除霜出风口, 经过除霜风道、除霜喷嘴后吹入车室内。考虑到实际情况中车内通风集中于前半区, 因此本文建立车室内前半部分模型, 具体构成如图 3 和图 4 所示。

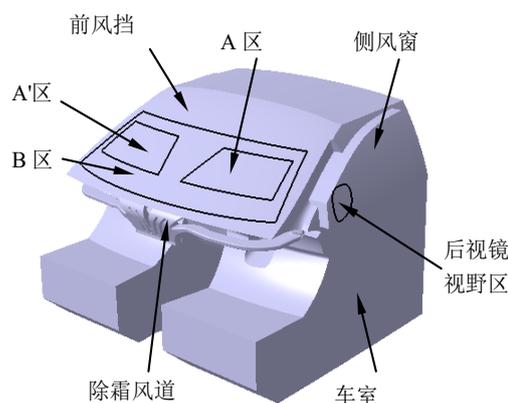


图 3 整车除霜模型简化示意图

Fig.3 Simplified vehicle defrosting model

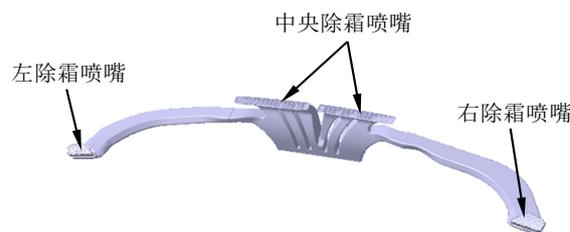


图 4 除霜风道

Fig.4 Defrosting duct

在整车除霜过程中, 车室内速度场达到稳定状态所需时间远小于温度场达到稳定状态所需时间。因此, 文中除霜性能模拟分两步进行。首先, 通过求解连续性方程、动量方程和湍流方程得出车室内速度场的分布; 随后利用速度场的稳态解, 完成能量方程的求解, 得出整个流场区域的瞬态温度场和除霜情况。在对除霜过程瞬态求解过程中, 基于以下两点简化: 不考虑热空气与霜层之间的辐射换热; 不考虑融化后的水在玻璃表面的流动, 即认为融化

过程中的冰水混合物及融化后的水静止在玻璃表面上。

采用 CFD 软件中的“焓法”进行计算，该方法将冰水混合物作为一种流体来处理，根据固态温度  $T_{solidus}$  和液态温度  $T_{liquidus}$  定义液相分数  $\beta$  来判定每个单元上的相变情况，具体定义如下：

$$H = h + \Delta H \tag{1}$$

其中

$$h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \beta L \tag{2}$$

式中： $H$  为流体总焓； $h_{ref}$  为参考焓，J/kg；

$T_{ref}$  为参考温度，K； $c_p$  为定压比热容，J/(kg·K)。

当  $T < T_{solidus}$  时  $\beta = 0$ ；当  $T > T_{liquidus}$  时

$$\beta = 1；\text{否则，}\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}}。$$

潜热  $\Delta H = \beta L$

式中： $L$  为液态潜热。

能量方程可写成：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S$$

式中： $\rho$  为流体密度，kg/m<sup>3</sup>； $\vec{v}$  为流体速度，m/s； $k$  为综合传热系数，W/(m<sup>2</sup>·K)； $T$  为流体温度，K； $S$  为源项。

### 1.2 网格划分及边界条件设置

采用四面体网格对热空气流经的区域划分，并将除霜风道、除霜喷嘴、前风窗、侧风窗附近网格进行加密；风窗玻璃、霜层采用偏移的棱柱网格，网格划分示意如图 5 所示。

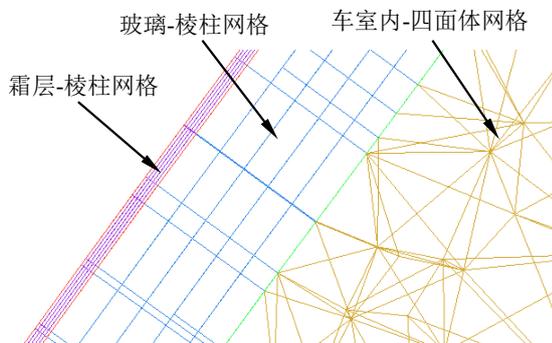


图 5 网格划分

Fig.5 Meshing Method

模型入口设置在除霜风道进口处，定义该位置

体积流量为 320m<sup>3</sup>/h，出口设置在 B 柱后侧，设置相对压力为 0Pa。瞬态计算过程中，时间项采用一阶隐式格式离散，时间步长设置为 5s；计算过程中涉及的物性参数如表 1 所示。

表 1 物性参数表

物性	空气 (20°C)	冰水	玻璃
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho = f(T)$	920	2400
比热/(J/kg·K)	1006.43	2040	750
热导率/(W/m·K)	0.0242	1.88	0.93
粘度/(kg/m·s)	1.79e-5	0.00553	-
潜热/(J/kg)	0	334960	-
固态温度/K	1	271	-
液态温度/K	2	273	-

## 2 模型验证及分析

### 2.1 国标工况下计算分析及试验验证

为验证 CFD 瞬态分析的可信度，根据现有的除霜试验数据（环境温度-18°C），提取出热空气温度随时间的变化关系，计算及结果如图 6、图 7 所示。

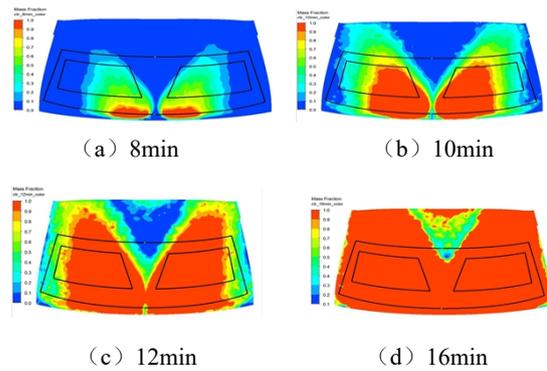
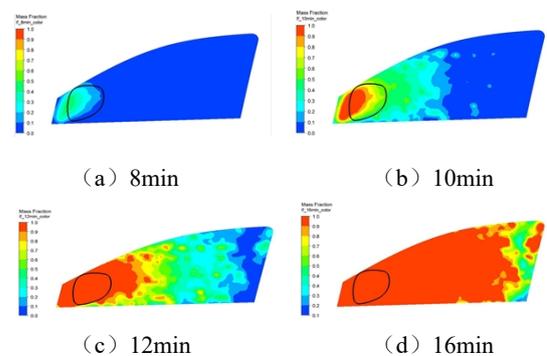


图 6 前风窗除霜效果

Fig.6 Defrosting effect of front window



(c) 12min

(d) 16min

图 7 左侧风窗除霜效果

Fig.7 Defrosting effect of left window

从图 6 和图 7 中可以看出,前风窗 10min 后 A 区完成 50%左右,12min 后 A 区完成 90%以上,16min 后, A 区完全除净; 侧风窗 8min 开始化霜,12min 后视野区完全除净, 16min 整个侧风窗基本除净。

通过与图 6、图 7 中的试验数据图 8 和图 9 对比可以看出,前风窗除霜过程,司机侧 8min、10min 的计算结果与试验结果吻合较好, 副驾驶侧 8min、10min 时刻计算结果稍慢于试验结果; 12min 以后,前风窗整体除霜效果与试验基本相符。侧风窗除霜过程, 12min 之前, 计算结果与试验结果较为相符; 12min 后, 计算结果稍快于试验结果。瞬态 CFD 计算的除霜过程与试验结果在时间上存在的差异, 分析原因为: CFD 计算在处理传热及相变过程中做了大量简化, 并且没有考虑霜层融化后水的流动带来的影响; 试验用的风道及除霜喷嘴为试制件, 配合处存在漏风, 导致喷嘴实际出风量与理论值有差异, 造成除霜效果的差异。

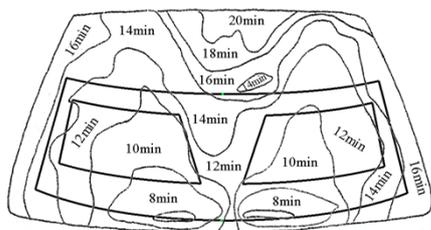


图 8 前风窗除霜试验曲线  
Fig.8 Defrost test curve of front window

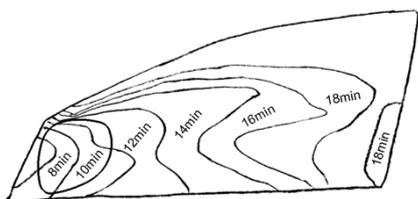


图 9 左侧风窗除霜试验曲线  
Fig.9 Defrost test curve of left window

对比以上瞬态 CFD 仿真结果和试验除霜曲线后认为, 利用瞬态 CFD 分析预测乘用车空调除霜效果是可行的。

### 2.2 环境温度对除霜效果影响研究

为研究环境温度对除霜效果的影响, 分别计算了环境温度在  $-25^{\circ}\text{C}$ 、 $-30^{\circ}\text{C}$ 、 $-35^{\circ}\text{C}$  条件下的除霜时间及除霜效果, 如图 10、图 11 和图 12 所示。

同时为确保计算的一致性, 忽略了环境温度对发动机水温上升速率的影响, 即认为在此三种工况下, 入口热空气温度随时间变化关系是相同的。

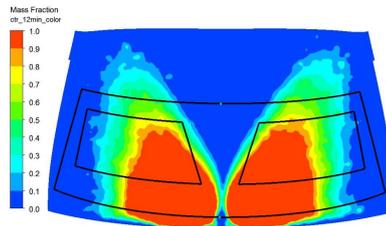


图 10  $-25^{\circ}\text{C}$  环境温度下 12min 前风窗除霜效果  
Fig.10 Defrosting effect of front window at  $-25^{\circ}\text{C}$  of 12minutes

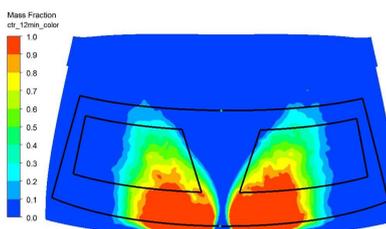


图 11  $-30^{\circ}\text{C}$  环境温度下 12min 前风窗除霜效果  
Fig.11 Defrosting effect of front window at  $-30^{\circ}\text{C}$  of 12minutes

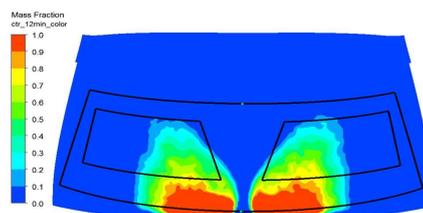


图 12  $-35^{\circ}\text{C}$  环境温度下 12min 前风窗除霜效果  
Fig.12 Defrosting effect of front window at  $-35^{\circ}\text{C}$  of 12minutes

从图 10、图 11 和图 12 可以看出, 环境温度对除霜效果的影响是十分明显的, 在寒区条件下, 需要更长时间完成除霜过程, 不同环境温度下除霜效果对比如图 13 所示。

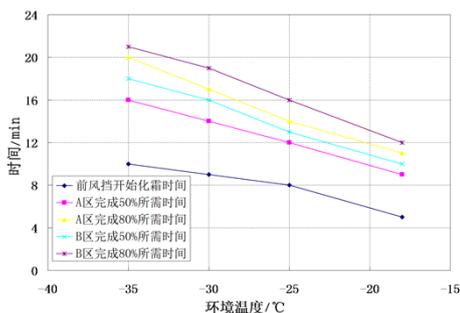


图 13 不同环境温度下 12min 前风窗除霜效果

Fig.13 Defrosting effect comparison at different temperature of 12minutes

从图 13 中可以看出, 除霜时间与环境温度之间的变化关系基本是线性的, 若要保证在-35℃环境下实现 A 区 20min 内完成 80%的要求, 至少需要-18℃环境下(国标工况) A 区 12min 完成, 这样在-35℃下才可以取得比较好的除霜效果。综合考虑后建议将原国标要求中的 20min 内 A 区完成 80%, 提升至 15min 内 A 区完成 80%。

### 2.3 怠速工况下除霜效果分析

为考核怠速工况下的除霜效果, 对环境温度-18℃工况进行模拟, 入口热空气温度随时间的变化关系来源于试验数据, 怠速工况前风窗除霜效果如图 14 所示。

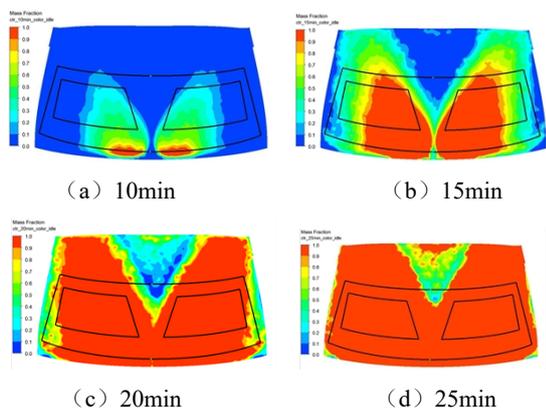


图 14 怠速工况前风窗除霜效果

Fig.14 Defrosting effect of front window at idle

从图中可以看出, 环境温度-18℃, 怠速工况除霜时, 10min 后, 前风窗玻璃开始化霜; 15min 后, A 区除霜完成 50%; 20min 后, A 区除霜完成 80%以上。冬季车辆怠速除霜, 用户希望时间越短越好, 所以有必要对整车的低温怠速除霜增加考核工况。综合考虑后, 建议在原国标要求中增加怠速工况考核, 要求 25min 后, A 区完成 80%以上。

### 3 结束语

(1) 建立整车除霜瞬态 CFD 分析模型, 并将分析结果与现有试验数据对比, 结果表明利用瞬态 CFD 分析预测乘用车空调除霜效果是可行的;

(2) 除霜时间与环境温度之间的变化关系基

本是线性的, 并且随着环境温度的降低, B 区除霜的效率与 A 区的除霜效率差异逐渐增大。

(3) 利用瞬态 CFD 分析得出了不同环境温度下前风窗、侧风窗的除霜情况, 量化了环境温度对除霜效果的影响和怠速工况对于除霜效果的影响结果。对国标除霜法规提出修改建议: 将原要求中的 20min 内 A 区完成 80%, 提升至 15min 内 A 区完成 80%, 并增加怠速工况考核, 即要求 25min 内 A 区完成 80%。

### 参考文献:

- [1] 张炳力,胡忠文,薛铁龙.基于程序集成及响应面模型的车辆除霜性能优化[J].汽车工程,2015,37(5):605.
- [2] 徐晓明,赵又群.汽车方舱空调系统的仿真分析[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(3):92.
- [3] 袁侠义,戴澍凯,姜叶洁,等.汽车除霜性能 CFD 分析与试验验证[J].客车技术与研究,2015,(5):52.
- [4] 谷正气,文琪,汤柱良,等.基于集成方法的汽车除霜除雾风道改进[J].中南大学学报(自然科学版),2017,(10):2649.
- [5] 胡兴军,葛吉伟,苗月兴.汽车除霜风道优化设计[C].第二十七届全国水动力学研讨会文集(上册),2015:625-628.
- [6] GB 11555-2009,汽车风窗玻璃除霜除雾系统的性能要求及试验方法[S].北京:中国标准出版社,2009:1-6.
- [7] 彭倩,黄继文,刘金武,等.客车空调送风参数对室内流场的影响研究[J].制冷与空调,2016,(6):716-719.
- [8] 于淼,王东屏,裘望,等.地铁车空调风道及车室内气流组织数值仿真[J].大连交通大学学报,2014,35(2):16-19.
- [9] 李红民.空调列车室内流动与传热的模拟研究[J].制冷与空调,2018,32(2):112-116.
- [10] 韩立辰,冯炼,袁艳平.地铁车站地道风系统降温效果的数值分析[J].制冷与空调,2016,(1):1-4.
- [11] 何丹.TL855 型矿山车辆驾驶室空调系统优化设计[D].西安:西京学院,2017.
- [12] AbdulNour B S. CFD Prediction of Automotive Windshield Defrost Pattern[J]. SAE Technical Paper, 1999,1:1203.