

# 蒸汽射流道路除冰效率仿真研究

张凯<sup>1</sup> 侯庆落<sup>1</sup>

## 摘要

提出将射流冲击技术应用于路面积冰去除,将具有一定温度、压力、流量等射流参数的蒸汽流体,经过射流管上的细孔喷出,冲击冰路结合处,使该区域温度迅速升高至融化,实现积冰与路面的快速分离,结合铲斗,将冰层推走.利用 Gambit 和 Fluent 流体仿真软件建立射流除冰的数值模型,研究不同孔径大小和分布规律对除冰效率的影响规律.仿真研究表明:随着区域内射流孔分布密度的增加,除冰效率也相应增大,其中 8 孔射流嘴除冰效率达到了 24 km/h,但随着孔数的增加,除冰效率并不成单调性增长,需要选择合适的最优值.

## 关键词

蒸汽射流; 除冰效率; 数值模拟; 孔径

中图分类号 U418.56

文献标志码 A

收稿日期 2012-03-07

## 作者简介

张凯,男,博士,教授,主要从事智能信息检测与装备自动化方面的教学科研工作.  
zkark@163.com

## 0 引言

冬季道路结冰对交通危害很大,且我国正处于高速公路与城市道路建设飞速发展、道路交通车辆迅猛增加的时期,因此,研究高效的道路除冰雪方法,有效清除高速公路、桥梁、机场等重要设施表面的冰层,具有现实意义.

经过长期的研究及工程实践,目前世界通用的除冰技术分为主动融冰技术和被动除冰技术 2 大类.前者主要是通过路面的特殊功能除冰,包括自应力弹性路面铺装技术、能量转化型融冰技术等.实际应用的除冰方法以被动除冰技术为主<sup>[1-4]</sup>.

主动除冰法包括很多,例如利用碳/玻璃纤维混合编织网增强混凝土进行融雪化冰<sup>[5]</sup>,高弹性橡胶颗粒置换细集料技术除冰<sup>[6]</sup>,太阳能、地热等自然能源加热法除冰<sup>[7]</sup>等.

被动除冰技术主要有机械法、化学法和物理能量法.机械法是利用作业机具产生的机械力清除路面积冰.化学法则是对结冰路面喷洒化学物质达到融冰目的.物理能量法主要是利用物理能量进行除冰,主要有压风式、热能式、波能式等.

纵观道路表面除冰技术的研究历史,其发展目标是高效率、低能耗、零损伤和环保化.因此,本文提出的高温气体射流冲击除冰雪技术及机理研究将有望解决现有除冰雪设备除冰不彻底、效率低、能耗高、污染环境等缺点,实现高效、快速、节能、环保的新型除冰雪方式.

## 1 物理模型

气体射流冲击技术已经普遍地应用于工业冷却和加热过程中.本文提出一种结合射流技术的以物理能量除冰的方法,以及与之配套的射流冲击除冰装置.工作原理如图 1 所示.

在传统机械挖掘斗前端附加一束温度、压力、和倾角等参数可调的射流.该射流来自高压气源,经稳压箱后进入浮子流量计,而后通过储气室经二次稳压后直接冲击冰层区域,通过射流管喷出的射流冲击路面和冰层接合处.冰层吸收射流的热量后温度升高并受到冲击力的作用.当温度升高到 0 °C 时,结合处冰层开始融化,当射流继续冲击加热,接合处冰层融化成水,并强烈吸收热量,加速冰层融化.力的作用促使冰层脱离路面,利用铲车的铲刀收集分离后的冰.冰雪收集到挖斗内后,在螺旋传送机的作用下快速地输送到卡车的拖斗内.

<sup>1</sup> 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京, 210044

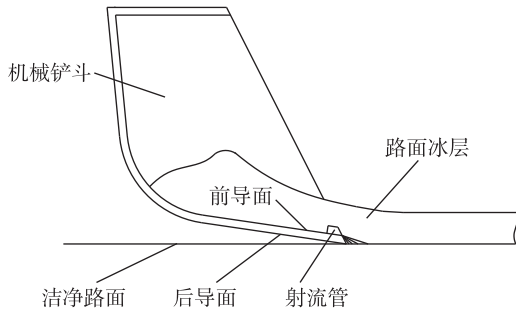


图1 射流除冰原理示意

Fig. 1 Principle of de-icing by impinging jet

此方法以较小的能量消耗,达到积冰与路面的快速分离,再辅以机械挖掘斗的推挤作用,实现路面积冰的快速去除。

本文将优化的具有一定温度和压力的射流冲击冰层与路面结合部,利用热传递作用分离冰层与路面.热量在从射流与冰层接触面横向传递的同时,也沿机器行进方向传递.冰/水焓值如表1所示。

表1 冰/水焓值

Table 1 Enthalpy of ice and water

温度/℃	焓值/(J/mol)
-10	0
-1	$3.8 \times 10^7$
0	$8.0 \times 10^7$
10	$1.2 \times 10^8$

## 2 模型建立与仿真

冰层在被加热的过程中,空间坐标上各个点的温度都会随着加热时间的变化而改变,因此对除冰模型的计算,就是要确定任一时刻计算区域内的各点温度,用数学的方法描述该计算模型就需要给出通用的冰层中各点的温度场公式,即  $T = f(x, y, z, t)$ . 热传导微分方程用于描述物体中任一点的温度与空间坐标和时间的关系的,利用物体的边界条件和时间条件,便可求得该物体温度场的数学解.为了能够方便地将本文研究的计算模型和热模型进行有效结合,在热模型计算中,采用网格划分形式,即有限体积法,将计算区域划分为有限的微元。

由于冰层和混凝土的路面材质都理想为均匀分布的,规定流入计算区域内部的热量为正,所以在  $dt$  时间内,从  $x, y, z$  3 个方向上进入计算区域内微元的热量可以表示为

$$\begin{cases} dQ_x = k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) dydzdt, \\ dQ_y = k \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dz dt, \\ dQ_z = k \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) dx dy dt. \end{cases} \quad (1)$$

由于能量的耗散,从  $x, y, z$  3 个方向上流出该微元内的热量可以表示为

$$\begin{cases} dQ_{x+dx} = -k \frac{\partial}{\partial x} \left[ T + \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dydzdt, \\ dQ_{y+dy} = -k \frac{\partial}{\partial y} \left[ T + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dx dz dt, \\ dQ_{z+dz} = -k \frac{\partial}{\partial z} \left[ T + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dx dy dt. \end{cases} \quad (2)$$

冰层吸收来自射流传递的热量,同时有部分的热量未经微元本身吸收,则在  $dt$  时间内,该微元所吸收的能量为导入的能量减去导出的能量,如下式所示:

$$dQ = [(dQ_x - dQ_{x+dx}) + (dQ_y - dQ_{y+dy}) + (dQ_z - dQ_{z+dz})], \quad (3)$$

又有  $dQ = cm\Delta T dt = c_i \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) dx dy dz dt$ , 其中  $c_i$  为冰的比热容,单位是  $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$ ,  $\rho$  为冰的密度,单位是  $kg \cdot m^{-3}$ 。

结合式(1)~(3)可以推出本文研究的三维温度场导热微分方程式为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c_i \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (4)$$

任何的仿真计算都受到一定的客观条件限制,本文所述的传热非常复杂,即使经过简化,在对其进行传热计算时,也需要谨慎考虑现有计算机数值模拟的硬件条件是否可以承受.为了在实际计算中兼顾到计算的实效和计算资源的合理利用,抓住影响传热过程主要特征的基本原则,截取部分冰层,并在模型建立过程中作如下假设<sup>[8]</sup>:

- 1) 射流直接冲击冰层,无中途能量耗散部分,即射流入口紧贴冰的壁面;
- 2) 冰层温度和外界环境一样;
- 3) 暂不考虑高温射流对道路材料的影响。

除冰效率同样可以理解为除冰能力,研究中普遍存在的定义方法有2种,一种是单位时间内的除冰雪距离,即速度(km/h),另外一种是以单位时间内的除雪量来衡量.本文将前一种定义作为参考基准来研究射流除冰的效率。

国家标准《除雪车》(征求意见稿)<sup>[9]</sup>对除雪车各项性能指标做出规定,其中,除雪车的推雪作业速度至少为 20 km/h,破冰作业速度不小于 5 km/h.

根据相关研究,当全雪路面车辆速度在 15 km/h 以下时,交通量随车速增加而增加;当车辆速度大于 15 km/h 时,交通量随车速增加而减小<sup>[10]</sup>. 实际路况统计数据得出,城市道路的平均速率在 20 ~ 40 km/h<sup>[11]</sup>. 结合国家标准<sup>[9]</sup>的相关规定,为了快速解决冰雪路面对正常交通的影响,满足人们正常出行和社会正常经济活动的诉求,除冰效率最好能够达到 15 km/h.

### 2.1 初始模型

本文利用仿真技术手段,通过确定两相流模型,建立传热和射流的数值模型,对不同喷嘴分布对射流的温度场以及传热速率影响进行分析<sup>[12-16]</sup>. 根据实际路面状况,设冰层厚度为 5 cm,整个计算域包含 60 mm × 6 mm × 50 mm 的冰层. 本文采用圆形射流嘴,且均匀分布在该计算区域,将每个射流嘴的有效长度设为 10 mm. 求解器选择 pressure based,求解时间为 unsteady,在迭代时,始终将时间步长设置为 0.000 1 s,时间数设置为 100,即仿真迭代时间为 0.01 s. 湍流模型选择标准 Kepsilon(2 eqn),采用 VOF 多相流模型和 solification & molting 模型,并将求解方程 Flow、volume Fraction、turbulence 和 energy 全部打开. 第一相为蒸汽,第二相为冰. 入口边界边界条件为 pressure inlet,值为 0.5 MPa,出口边界条件为 pressure outlet. 冰块初始温度为 263 K,水蒸汽初始温度为 373 K,融化和凝固温度均为 273 K, melting heat 为  $3.4 \times 10^5$  J/kg. 为了有效监测冰层内部温度变化趋势,以及计算除冰效率,将冰层轴线上的点 1(10 mm, 30 mm, 25 mm)和点 2(20 mm, 30 mm, 25 mm)作为监测点.

为研究同样冲击面积下,不同圆孔分布密度(孔

的数量)对热传导效率的影响程度,分别取喷嘴数为 4、6、8,显然,不同圆孔分布情况下的射流嘴直径不一,分别取 5、4 和 3 mm,结构分布如图 2 所示.

### 2.2 4 孔射流嘴除冰效率仿真

以下 3 种网格模型均使用 cooper scheme 和 2.0 倍的 size 进行网格划分. 将 3D 网格文件导入 fluent,进行网格质量检测后,各项参数与边界条件设置如前文所述,初始化冰层初始温度为 263 K 之后,进行迭代. 由于 4 个孔分布在冰层的中心位置,受热后的温度分布在内部,除了入口处以外,内部的受热分布情况难以完全观测,故在接下来的几个温度分布中,将表面做半透明处理,显示内部一个切面,如图 3 所示.

由于温度分布和体积分数之间具有对应关系,在接下来的求解中,二者取其一并予以显示. 从图 3 中可以看出,随着离射流孔位置距离的增加,受热情况开始变得狭窄,热力作用开始衰减,形状呈牙齿状. 监测点 1 和 2 温度变换时间历程如图 4 所示.

由图 4 可看出,靠近射流孔的点受热速度很快,而稍远的点在大概 60 步的求解计算后,温度从 263 K 升高至熔点 273 K,此过程历时 0.006 s. 为了研究整体除冰效率,选择点 2 的温度变化来计算除冰速度. 由于点 2 距离射流入口位置为 0.02 m,所以,4 孔结构的射流除冰效率达到 12 km/h.

### 2.3 6 孔射流嘴除冰效率仿真

经过设定好的 0.01 s 迭代求解时间后,得到如图 5 所示的体积分数云. 监测点 1 和 2 经过 0.01 s 求解后温度变化时间历程如图 6 所示.

从图 5 可以看出,冰块融化的长度并不比 4 孔距离更大,但是由于孔径的减小,6 孔排列的比 4 孔更加致密,从广度上讲,不像 4 孔的齿形受热分布,除冰范围要比 4 孔大的多.

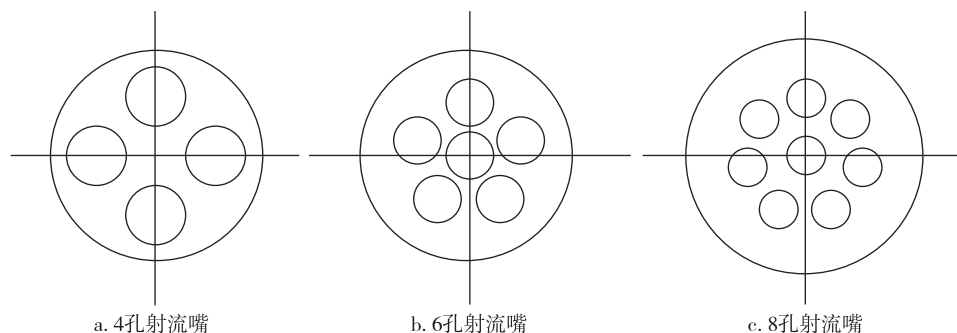
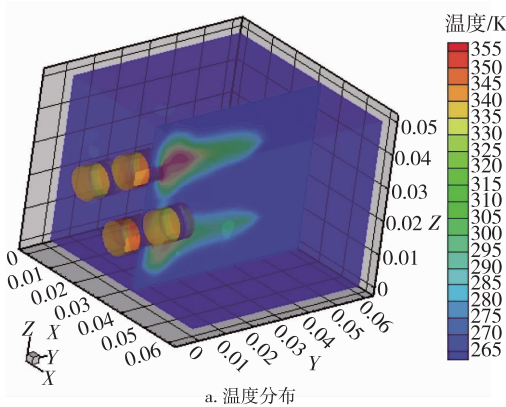
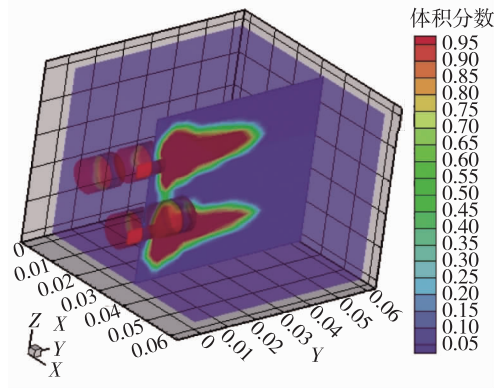


图 2 不同射流嘴分布

Fig. 2 Different patterns of nozzle distribution



a. 温度分布



b. 体积分数云

图3 4孔温度分布及体积分数云

Fig.3 Temperature distribution and liquid fraction of 4-nozzle pattern

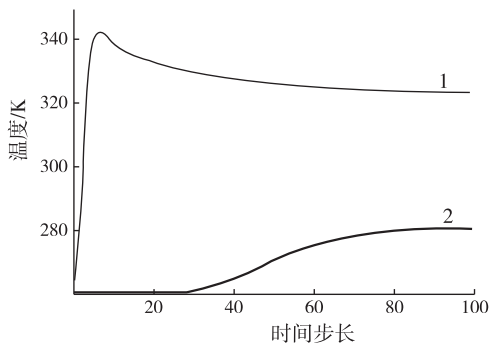


图4 4孔监测点温度变化时间历程

Fig.4 Temperature variation of monitors for 4 nozzle pattern

图6中,点1的温度上升速度加快,且顶峰温度也较高.点2的趋势仍然是平稳增加,但是融化温度稍有提前,从初始状态的263 K,经过大概50步迭代之后即达到了融化温度,时间约为0.005 s,除冰速度计算结果为14.4 km/h.

### 2.4 8孔射流嘴除冰效率仿真

将网格 mesh 文件导入 fluent 求解后,分度分布

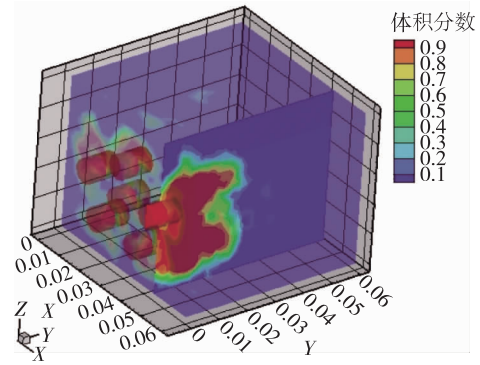


图5 6孔体积分数云

Fig.5 Liquid fraction of 6-nozzle pattern

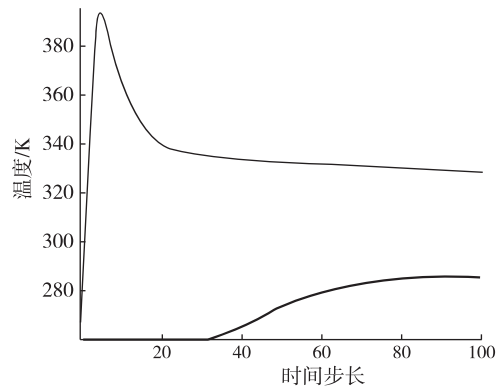


图6 6孔监测点温度变化时间历程

Fig.6 Temperature variation of monitors for 6 nozzle pattern

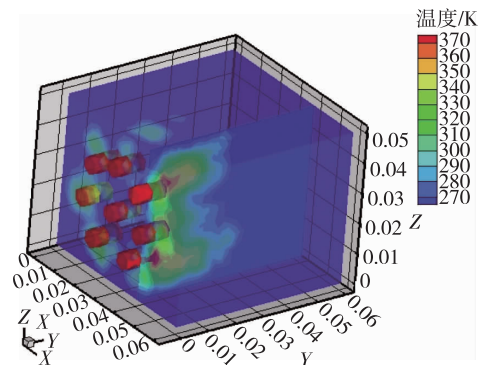


图7 8孔温度分布

Fig.7 Temperature distribution of 8-nozzle pattern

如图7所示,监测点1和2温度变化时间历程如图8所示.

点1的温度上升速度很快,点2熔点到来的时间提前很多,且最后温度稳定时的温度值与点1更加接近,说明射流经过点2后的能量依旧很大.从初始状态的263 K,经过大约30步迭代之后即达到了

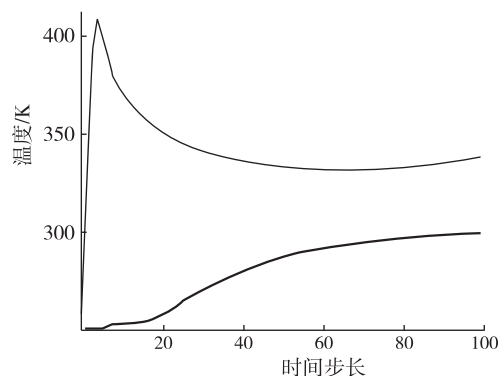


图8 8孔监测点温度变化时间历程

Fig. 8 Temperature variation of monitors for 8 nozzle pattern

融化温度,约为0.003 s,除冰速度为24 km/h.

对比得出,孔径越小,同样大小区域内的孔数越多,除冰效率随之增大.但是当喷嘴个数稍多,分布规律不合理时,从射流嘴中射出的各束射流在圆周方向组织较密,相互间距变小,彼此间射流受到阻碍,射流容易附壁流动,引起摩擦损失,耗散率大,造成传热效率低下,孔数的增加并没有得到充分的利用,于是造成6孔仅在效率上提高了2 km/h.8孔的个数最多,但是由于分布较合理,各束射流间的扰动很小,且同样压力下的出口速度更大,冲击面更小,因而更容易与冰层内部结构进行充分热交换,除冰效率更高.

### 3 结论

本文以工程应用为背景,综合运用了包括流体力学和有限元理论建立射流冲击除冰的物理模型和数学模型,研究射流冲击除冰中射流嘴孔径大小对效率的影响规律.利用Gambit和Fluent流体仿真软件数值模拟,结果表明:喷嘴个数为6的射流性能好过4孔,但是孔数的增加并没有得到充分利用,只是在效率上提高了2 km/h;8孔的个数最多,而且8孔的占用面积较少,冲击阻力小,除冰效率成比例的快速增大,在同样的除冰时间下,所耗费的能量小,是高效除冰和节能的理想方法.本文尚未研究到更小孔径的除冰效率,以及射流因素对道路的影响规律,将在以后的研究中加以拓展.

### 参考文献

#### References

[1] 高青,于鸣,刘小兵.基于蓄能的道路热融雪化冰技术及其分析[J].公路,2007(5):170-174  
GAO Qing, YU Ming, LIU Xiaobing. Technique and anal-

ysis of snow-ice melting system on road by thermal energy storage[J]. Highway, 2007(5):170-174

- [2] 唐相伟,焦生杰,高子渝,等.微波除冰国内外研究现状[J].筑路机械及施工机械化,2007,24(11):1-4  
TANG Xiangwei, JIAO Shengjie, GAO Ziyu, et al. Research status quo of microwave ice removing technology [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(11):1-4
- [3] 唐相伟.道路微波除冰效率研究[D].西安:长安大学公路学院,2009  
TANG Xiangwei. Study of microwave deicing efficiency on road[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2009
- [4] Lee C H, Lim K B, Lee S H, et al. A study of the heat transfer characteristics of turbulent round jet impinging on an inclined concave surface using liquid crystal transient method [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(6):559-565
- [5] 黄婷婷.纤维编织网增强混凝土融雪化冰的技术研究[D].大连:大连理工大学交通运输学院,2011  
HUANG Tingting. A Study of applied technology in deicing and melting snow by textile reinforced concrete[D]. Dalian: School Transportation & Logistics, Dalian University of Technology, 2011
- [6] 周纯秀.冰雪地区橡胶颗粒沥青混合料应用技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学交通科学与工程学院,2006  
ZHOU Chunxiu. Study on granulated crumb rubber asphalt mixture technology in frost region [D]. Harbin: School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2006
- [7] 王庆艳.太阳能-土壤蓄热融雪系统路基得热和融雪机理研究[D].大连:大连理工大学交通运输学院,2007  
WANG Qingyan. Research on roadbed heat storage and snow-melting mechanism in solar-heat storage in soil snow-melting system [D]. Dalian: School Transportation & Logistics, Dalian University of technology, 2007
- [8] 邓洪超.积雪路面GPR探测信号处理与雪铲自动控制研究[D].长春:吉林大学交通学院,2007  
DENG Hongchao. Research on signal processing of GPR detecting snow-cover road surfaces and automatic control of the snow shovel [D]. Changchun: College of Traffic, Jilin University, 2007
- [9] 国家质量监督检验检疫总局.除雪车(征求意见稿)[S].2004  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Snow blower (Exposure draft) [S]. 2004
- [10] 何永明,崔淑华.冰雪路面通行能力衰减分析[J].交通标准化,2010(9):39-41  
HE Yongming, CUI Shuhua. Traffic capacity attenuation of ice or snow road [J]. Transport Standardization, 2010(9):39-41
- [11] 孙逢春,王震坡,王军.北京市公共汽车平均车速统计分析[J].汽车工程,2003,25(3):219-222  
SUN Fengchun, WANG Zhenpo, WANG Jun. Statistical analysis on the average speed of public buses in Beijing

- [J]. *Automotive Engineering*, 2003, 25(3):219-222
- [12] 王永珍,高青,王国华,等. 射流角度对车辆车窗玻璃除霜性能的影响[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2009, 39(增刊2):279-282  
WANG Yongzhen, GAO Qing, WANG Guohua, et al. Effect of impinging jet angles on vehicle windshield defrosting performance[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2009, 39 (sup2): 279-282
- [13] Kikkert G A, Davidson M J, Nokes R I. A jet at an oblique angle to a cross-flow[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2009, 3(2):69-76
- [14] Janetzke T, Nitsche W, Täge J. Experimental investigations of flow field and heat transfer characteristics due to periodically pulsating impinging air jets [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2008, 45(2):193-206
- [15] Moon H-J. Analysis of flame shapes in turbulent hydrogen jet flames with coaxial air[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, 23(6):1743-1750
- [16] Middelberg G, Herwig H. Convective heat transfer under unsteady impinging jets: The effect of the shape of the unsteadiness [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2009, 45(12):1519-1532

## Study on road de-icing efficiency with impinging vapor jet

ZHANG Kai<sup>1</sup> HOU Qingluo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Information and Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Jet impinging technology is put forward to remove the ice on the road. The vapor jet with certain temperature, pressure, and flow is injected through several small nozzles to icy road. The ice is warmed or even melted, thus separated from the road and then are pushed away by a forklift truck. The softwares named Gambit and Fluent are used to establish numerical model and study the de-icing efficiency with different nozzle distribution patterns in same area. Results show that the de-icing efficiency is improved with the increase of jet nozzle number, which can reach 24 km/h with 8 nozzle pattern. Yet the increase of de-icing efficiency is not in linear relationship with increase of the nozzle number, thus an optimal value of nozzle number is needed to choose.

**Key words** vapor jet; efficiency of de-icing; numerical simulation; aperture