

# 风力机叶片前缘单排孔射流成膜特性研究

于静梅<sup>1</sup> 陈 诚<sup>2</sup> 刘盼盼<sup>1</sup> 孟凡丹<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 机械工程学院 辽宁 阜新 123000; 2. 朝阳燕山湖发电有限公司 辽宁 朝阳 122000)

**摘 要:** 针对寒冷气候条件下大型垂直轴风力机叶片翼型前缘结冰问题, 提出一种新的叶片防冰、除冰方法—气膜加热法。通过在风力机叶片翼型前缘开设气膜孔, 并对三维静叶片进行数值模拟研究, 观察其成膜情况, 从而确定孔径和孔间距大小。将设置好孔径、孔间距的三维风轮进行变工况非稳态数值模拟, 通过分析三维风轮气动特性, 确定最佳运行工况, 并观察该工况下不同时刻叶片表面成膜情况。最后, 运用相似理论, 对按同比例缩小的原型机进行试验分析, 将模拟结果与试验研究进行对比, 发现两者平均转矩随尖速比变化趋势基本一致。说明开孔翼型不但能起到很好的防冰、除冰作用, 而且适当开孔后叶片气动性能变化不大。

**关键词:** 风力机叶片; 气膜加热; 气动性能; 风能利用率  
中图分类号: TK83 文献标识码: B  
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.02.018

## 引 言

目前, 对于风力机桨叶的防、除冰方案主要有3大类: 机械除冰, 被动式除冰, 主动式除冰<sup>[1]</sup>。机械除冰方案主要有人工手动除冰、膨胀管除冰两种, 其中手动除冰效率极低, 且操作危险系数高, 而加装膨胀管会影响叶片的气动性能, 且噪声大, 难以维护。被动式除冰主要有翼型表面防结冰涂装及叶片表面喷洒化学除冰药剂等, 该方案总体上除冰效率比手动除冰高, 但维护成本也比较高。主动式除冰包括电加热法、内部通热风法等, 此方案成本相对较高, 系统较复杂, 除冰效率相对前两项较高。

近年来, 针对效率较高的主动式除冰方案研究较多。如丹麦的 LM Glasfiber 提出利用高频波穿过玻璃钢后在叶片表面产生热量使冰融化的微波技术来解决结冰问题, 但由于技术尚未成熟, 并且耗能较

高, 故不能很好的实现商业化<sup>[2]</sup>; 许斌提出电阻丝加热除冰方法, 此方法在飞机机翼除冰上有应用, 除冰效果较好, 但是风力机叶片加装电阻丝会消耗很大能量, 且安装困难, 并且玻璃纤维材质导热性能极低, 因此商业应用极少<sup>[3]</sup>; L. Battisti 和 R. Ederizzi 基于数值模拟基础上提出循环加热除冰方法<sup>[4]</sup>, 模拟结果中显示能够除冰循环热气的最佳温度范围是 80-120℃。在 60-80℃ 时勉强能除冰, 高于 120℃ 就会损伤叶片, 提供如此高温气体会耗费大量能量, 从经济成本上考虑此方法太过浪费。

本研究提出一种新的防冰、除冰方法—气膜加热法。在风力机叶片前缘设置一排射流孔, 孔射流热气在主流的压力和摩擦力下向下游弯曲, 附着在壁面一定区域上, 使叶片前端与冷气流隔离, 以达到防冰、除冰目的。相比其它主动式除冰方案, 该方法具有加热均匀, 对叶片损伤小, 系统相对简单, 安全可靠等优点。

## 1 基于气膜加热的风力机模型建立

### 1.1 气膜加热机制

防冰、除冰思想来源于在飞机机翼防冻问题上应用较广的二维槽缝热气喷射方法。利用高温射流在叶片表面形成一层薄的热气膜, 使叶片前部与来流冷空气隔离, 从而起到防冰作用<sup>[5]</sup>。气膜加热有效度是度量气膜加热效果的一个重要参数, 其定义如公式(1)。

$$\eta = \frac{T_m - T_w}{T_m - T_c} \quad (1)$$

式中:  $T_m$ —主流温度, K;  $T_c$ —射流温度, K;  $T_w$ —翼型表面附近流体温度, K。计算可得  $\eta$  高于 30% 才能

收稿日期: 2015-02-03; 修订日期: 2015-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(51104083, 51374123)

作者简介: 于静梅(1973-), 女, 吉林桦甸人, 辽宁工程技术大学副教授, 硕士生导师。

起到对叶片的保护作用(使  $T_w \geq 273.15 \text{ K}$ ) ,故在分析加热效果好坏时以加热有效度 30% 为基准。气膜加热原理如图 1 所示。

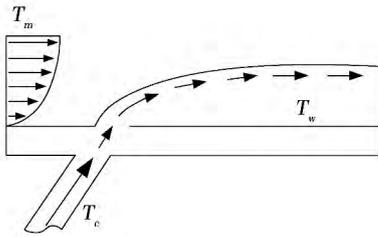


图 1 气膜加热二维结构图

Fig. 1 Schematic view of gas film heating

### 1.2 几何模型

叶片采用 NACA 4 位数系列对称翼型建立模型 ,由于叶片前缘部位开设气膜孔 ,考虑到风力机对叶片强度及高升阻比的要求 ,为了提高叶片展向强度 ,故选择 NACA 0020 翼型<sup>[6]</sup>。风力机几何尺寸列于表 1 中。

表 1 桨叶的几何参数

Tab. 1 Blade geometric parameters

翼型	叶片数 $B$	风轮直径 $D/m$	翼型弦长 $c/m$	展向长度 $H/m$
NACA0020	4	15	1	10

### 1.3 网格划分

整个计算域通过 Gambit 建模并采用分块网格划分方法 ,根据不同区域结构划分不同网格<sup>[7]</sup>。在对单个三维静叶片模拟分析时 ,采用六面体网格单元且对叶片附近网格进行加密处理 ,总网格数为 66 万左右 ,单叶片三维网格划分如图 2 所示。

在对三维风轮进行变工况非稳态数值模拟研究时 ,将风力机流场划分为外部风场域、内部旋转域。流场主要采用分块结构化网格 ,中部圆环域采用非结构化网格 ,并对翼型表面及中部圆环域附近网格进行加密处理。网格总数为 90 万左右。风力机三维模型截面示意图如图 3 所示。

## 2 数值方法

### 2.1 边界条件

计算模型边界条件为:进口采用速度进口边界

条件 ,温度设定为 253 K;出口设为压力出口 ,压力为一个标准大气压 ,温度设定为 253 K ,孔射流速度为 15 m/s ,射流温度设定为 320 K;部分滑移面采用了滑移网格技术 ,转动部分与静止部分交界设置为交界面;采用充分发展的湍流条件;固壁边界采用对称边界。

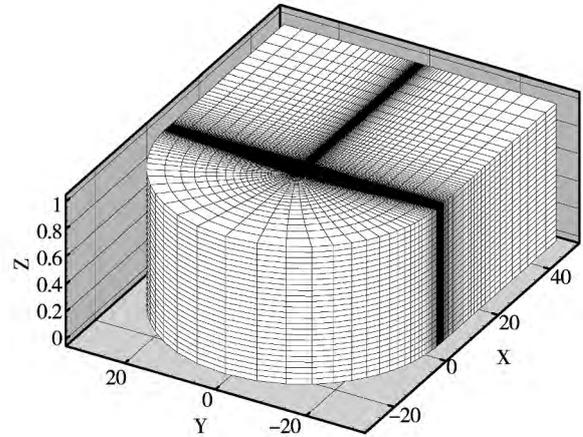


图 2 单叶片三维模型网格

Fig. 2 Single - blade model grid

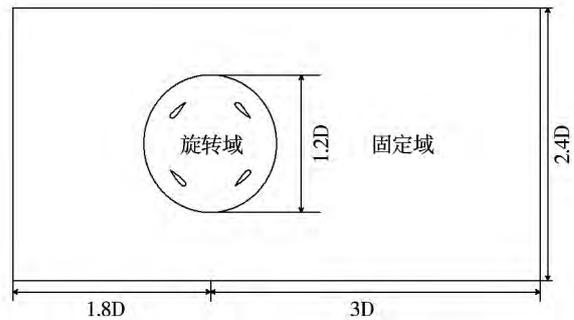


图 3 风力机三维模型截面示意图

Fig. 3 Sectional diagram for three-dimensional model of wind turbine

### 2.2 控制方程及计算方法

计算采用涡黏模式的低雷诺数 Realizable  $k - \epsilon$  模型 ,计算量小 ,稳定性高 ,结合压力耦合 SIMPLEC 算法 ,基于有限容积求解器 ,黏性项的离散项为中心差分 ,对流项为二阶迎风 ,收敛精度为  $10^{-6}$ 。通用控制方程如公式(2)。

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S \quad (2)$$

式中:  $\Phi$ —通用变量 ,可以代表  $u, v, w, T$  等求解变量;  $\Gamma$ —广义扩散系数;  $S$ —广义源项 ,对于特定的

方程  $\phi$ 、 $\Gamma$  和  $S$  具有特定的形式。

### 3 数值模拟结果与分析

#### 3.1 孔径对气膜形成的影响

叶片孔径基于翼型前缘半径及射流出流情况, 故对截圆直径 2 - 2.5 cm 范围的 11 种孔径进行数值研究<sup>[8-9]</sup>。为了更精确分析气膜加热效果, 将每个孔有效作用面积定义为  $S_i$ , 本研究只对展向部分叶片(含 4 个孔)进行研究分析, 则总有效面积  $S$  的表达式为(3)。

$$S = \sum_{i=1}^4 S_i \quad (3)$$

式中:  $S$ —总有效加热面积  $\text{m}^2$ ;  $S_i$ —单个气膜孔有效加热面积  $\text{m}^2$ 。不同孔径下射流流量及有效加热面积如图 4。

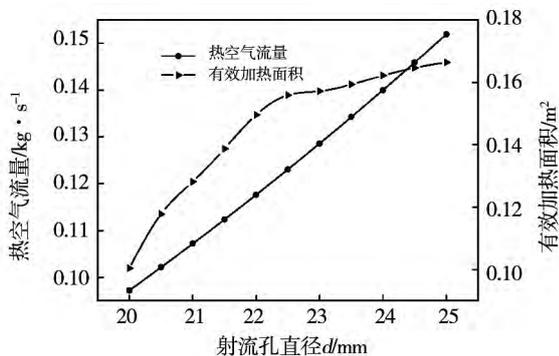


图 4 不同孔径气膜加热有效面积与热空气质量

Fig. 4 Effective heating area and hot air mass flow rate for different hole diameters

从图 4 中可以看出, 在射流速度一定时, 随着孔径增大, 热空气质量流量逐渐增多, 气膜加热有效区域越来越大, 但是在孔径由 2.25 cm 增大至 2.5 cm, 有效加热区域面积增速放缓, 考虑到孔径过大会耗费更多的能量, 并且射流对主流气体的干扰进一步增大, 严重时使翼型提早进入轻失速状态, 从而改变翼型升阻力, 使转矩系数和功率系数降低。故将叶片孔径定为 2.25 cm, 该孔径下叶片表面气膜加热有效度如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 气膜加热有效度高于 0.3 的区域大小适中, 叶片受热较为均匀, 但由于孔间距过大, 相邻两孔间存在加热死区。

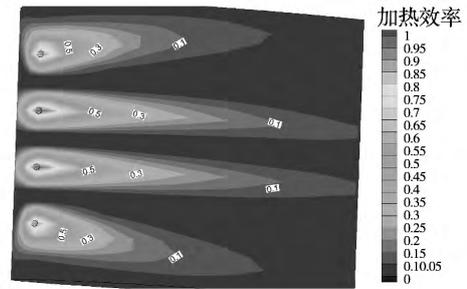


图 5 2.25 cm 孔径下气膜加热有效度

Fig. 5 Film heating efficiency of 2.25 cm hole diameter

#### 3.2 孔间距对气膜形成的影响

下面对不同孔间距进行数值模拟研究, 以消除加热死区。将  $L/d$  定义为相对孔间距,  $L$  为两相邻孔间距离,  $d$  为气膜孔直径。对  $L/d$  范围 2 - 10 的 9 种模型分别进行数值研究, 为便于观察本研究只列出  $L/d$  为 4、5、8 时 3 种相对孔间距叶片表面温度云图及成膜情况, 如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,  $L/d = 8$  时, 由于孔间距离过大, 小孔直径有限, 单个射流孔出流气体覆盖面积有限, 孔与孔之间存在明显加热死区, 使叶片受热不均匀, 不能很好地起到防冰、除冰作用。 $L/d = 5$  时, 中间部位仍存在加热死区, 但加热死区明显减少。 $L/d = 4$  时, 叶片表面形成一层有效的热气膜, 各射流孔出流气体很好的贴附于翼型前缘附近区域, 加热死区已经消除, 叶片前缘附近区域得到很好的气膜保护作用。故后续研究暂定相对孔间距为 4, 此时叶片前缘表面完全处于被保护的状态且不存在加热死区, 将气膜孔再进行加密会耗费更多的能量, 并且会过多的干扰主流流场, 进而改变叶片气动性能, 因此再对气膜孔进行加密意义不大。

#### 3.3 三维旋转叶片气动特性数值研究

对于风力机来说, 风能利用系数  $C_p$  是衡量风力机性能优劣的一个重要指标。不同风力机的  $C_p - \lambda$  曲线是不同的, 这与风力机叶片自身结构有关。对有孔风力机叶片进行研究, 有必要分析开孔叶片气动性能, 并与无孔叶片做对比分析。本研究对尖速比  $\lambda$  分别为 1.04、1.32、1.65、2.06、2.44、2.55、3.01、3.52、4.01、4.54、5.05、6.15 这 12 种情况进行数值模拟分析。模拟后由 Fluent 导出转矩, 并计算出转矩系数和风能利用系数<sup>[10-12]</sup>, 其  $C_p - \lambda$  如

下图 7 所示。

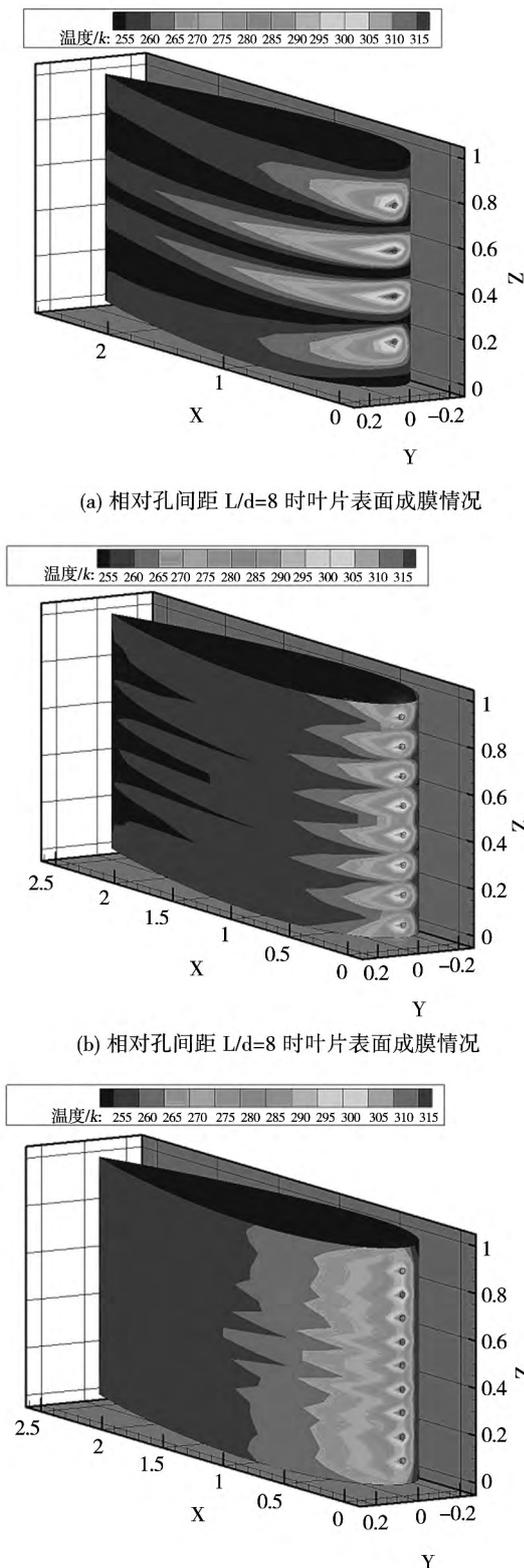


图 6 不同  $L/d$  叶片表面温度情况

Fig. 6 Surface temperatures for different  $L/d$  blades

从图 7 可以看出, 风能利用系数最大值为 0.38,

此时尖速比为 2.55。经验得出的大型垂直轴风力机运行的最佳尖速比范围为 2.5 - 2.8, 而通过数值模拟得到的风力机最佳尖速比为 2.55, 与实际完全相符。本研究通过数值模拟计算得到的  $C_p$  随着  $\lambda$  的增加先增大后减小, 最佳  $C_p$  为 0.38, 虽然有些偏小, 但对于大型垂直轴风力机来说已经达到很好的运行效果。有气膜孔的直线翼垂直轴风力机的  $C_p - \lambda$  曲线与无孔风力机在相同条件下变化趋势基本一致, 说明有孔翼型气动性能与无孔相比变化较小。

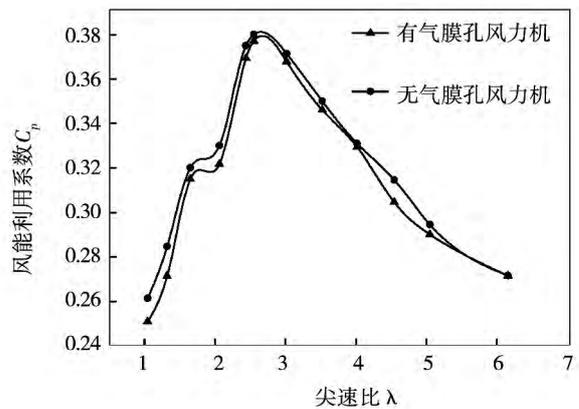


图 7 有、无气膜孔风力机的  $C_p - \lambda$  曲线

Fig. 7 Wind turbine  $C_p - \lambda$  curves with and without film holes

大型风力机转矩是非常重要的一个气动参数, 故对风力机的转矩进行了分析, 并给出了有、无气膜孔直线翼垂直轴风力机的转矩系数曲线, 如下图 8 所示。

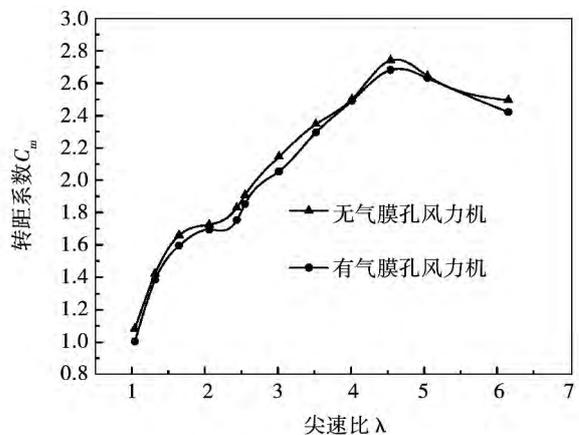


图 8 有、无气膜孔风力机的  $C_m - \lambda$  曲线

Fig. 8 Wind turbine torque  $C_m - \lambda$  curves with and without film holes

从图中可以看出,有气膜孔风力机与无气膜孔风力机的转矩系数  $C_m$  随着尖速比  $\lambda$  的增加,趋势基本一致,且两种风力机的  $C_m$  都是先增加后减小。其中无气膜孔垂直轴风力机的最小  $C_m$  为 1.082 4,最大  $C_m$  是 2.741 6;有气膜孔垂直轴风力机最小  $C_m$  为 1.003 9,最大  $C_m$  为 2.681 5。从图中两条曲线还可以看出,有气膜孔直线翼垂直轴风力机转矩曲线在无气膜孔风力机的下面,说明有孔风力机的气动性能较无孔的差点,但是二者差距不大。

下面对最优工况分析,此时叶片孔径取 2.25 cm,孔间距  $L/d = 4$ ,叶尖速比  $\lambda$  取 2.55,孔射流速度 15 m/s。三维风力机非定常数值模拟在运行达到稳定后转到不同位置时叶片表面成膜情况如下图 9 所示。

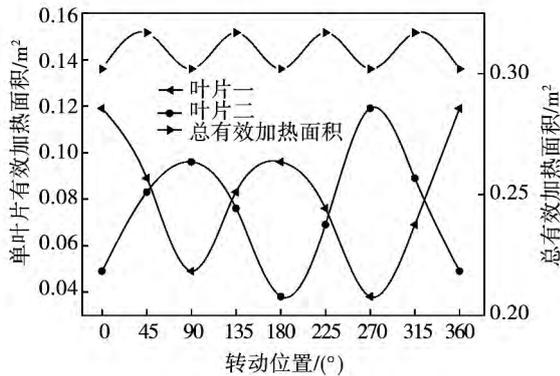


图 9 稳态后叶片运动到不同位置时表面成膜情况

Fig.9 Surface filming conditions for blade located in different positions under steady state

本研究只对稳态后叶片表面成膜情况进行观察,并规定叶片 1 处于 90°为起始位置,故只列出 2 个叶片表面有效加热面积曲线。从图 9 中单个叶片有效加热面积曲线情况知,单个叶片在旋转一周的过程中不同位置表面有效加热面积在时刻变化,并且上风侧有效加热面积要好于下风侧。同一风轮不同叶片在同一时刻表面成膜情况也不同。总有效加热面积最小值为 0.302 m<sup>2</sup>,最大值为 0.317 m<sup>2</sup>,并且呈现周期性变化趋势。由图 10 中叶片 1 旋转 135°时叶片表面温度等值线图可知,虽然叶片在旋转一周的过程中大部分时间只有一个面能得到热气膜的防护,但这并不影响气膜防冰,因为从图中可看出,单个叶片在旋转一周的过程中吸力面和压力面

交替得到热气膜的防护。这样风力机周期性的运行下去,风力机叶片前缘附近能很好的得到气膜防护,从而起到防除冰的作用。

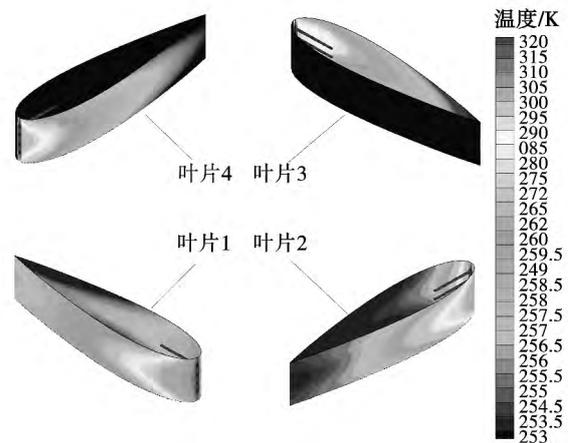


图 10 稳态后 135°叶片表面温度情况

Fig.10 Surface temperature of 135° blade under stable state condition

#### 4 实验分析

大型风力机的研发往往建立在小型风力机基础之上,在风洞中对按比例缩小的风力机模型进行试验,通过试验来分析大型风力机功率、扭矩等特性,以此来减小风力机设计风险<sup>[13]</sup>。

风力机模型与原型相似是指在风力机模型试验中,模型和原型风轮与空气的能量传递过程以及空气在风轮内的流动过程相似<sup>[14]</sup>。在分析过程中,假设流过风轮的空气是不可压缩流体,满足几何相似、运动相似等条件;风力机特征参数主要有:无量纲的功率系数  $C_p$  以及扭矩系数  $C_m$ 。如果风力机原型和模型的特征参数相同,那么它们将具有相同的流动条件。因此,作如下假设可达这一目的:(1) 风力机原型和模型叶尖速比相等;(2) 采用相同的比例变换来得到风力机原型;(3) 风力机原型和模型叶片翼型、数量和材料也相同。

##### 4.1 实验参数

实验在辽宁工程技术大学动力工程实验室进行,实验台在密闭风洞中,风力机桨叶模型采用空心玻璃钢,而整个实验段由有机玻璃制成<sup>[15]</sup>,试验叶片几何参数如表 2 所示。

表 2 桨叶的几何参数

Tab.2 Blade geometric parameters

翼型	NACA0020
叶片数 $B$	4
风轮直径 $D/m$	1.5
翼型弦长 $c/m$	0.1
展向长度 $H/m$	1
气膜孔直径 $D/mm$	2.5

4.2 实验结果

这里仅讨论风力机气动转矩随叶尖速比变化趋势情况。令  $R/R_m = a$  为风力机原型与模型的几何尺寸相似比例因子,依据相似准则,存在转矩关系  $M/M_m = a^3$ 。对有孔与无孔风力机基于相似原理的试验分析如下图 11 所示。

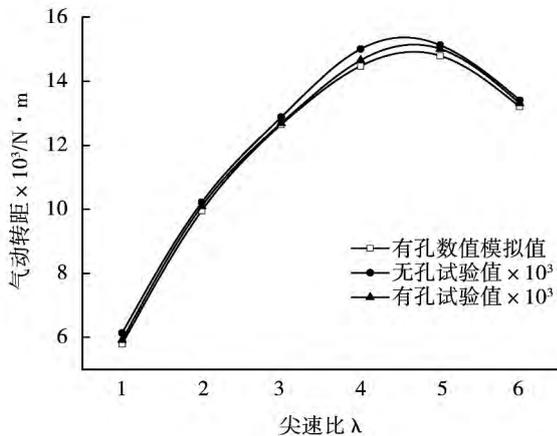


图 11 数值模拟值与实验值对比

Fig. 11 Comparison of simulation results and experimental results

从图中可以看出,基于相似原理的有孔风力机模型试验值与数值计算值两者变化趋势基本一致的,有少许偏差,说明本文采用数值计算方法可以较好地模拟有孔叶片气动特性及流场情况。有孔与无孔风力机气动特性与无孔情况下的试验值差别不大,说明在适当开孔条件下,风力机叶片气动特性变化不大。

5 结 论

本研究采用数值模拟和试验研究相结合的方法,得到以下结论:

(1) 通过对单个三维静叶片建模并进行数值模拟分析,确定出基于特定工况下的射流孔孔径及孔间距,为后续数值研究做准备。

(2) 结合最优孔组合方案对三维风力机进行非稳态数值模拟,并与相同条件下无孔风力机气动特性对比分析,发现叶片适当开孔对风力机气动性能负面影响不大。并观察最优工况下一个周期内不同时刻叶片表面成膜情况,得到风轮叶片总有效加热面积在  $0.302 - 0.317 \text{ m}^2$  范围周期性变化,能很好地起到加热效果,证明气膜加热方案可行。

(3) 运用相似原理对缩小模型进行风洞试验,得到数值分析与试验研究在不同尖速比下的气动转矩基本相当,验证数值研究的可行性。

(4) 研究结果对 H 型垂直轴风力机防、除冰叶片的设计具有一定的参考意义。

参考文献:

[1] 庄恒东,黄辉秀,徐 阳. 风机叶片防冰、除冰方案探讨[J]. 科技创新导报. 2013, 22: 97 - 98.  
 ZHUANG Hen-dong, HUANG Hui-xiu, XU Yang. Fan blade anti-icing, de-icing program to explore[J]. Science and Technology Innovation Herald. 2013, 22: 97 - 98.

[2] Matthew C. Homola, et al. Effect of atmospheric temperature and droplet size variation on ice accretion of wind turbine blades [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 2010, 98: 724 - 729.

[3] 许 斌,于静梅. 基于电加热法的自控型防冰除冰叶片结构研究[J]. 应用能源技术 2012, 12: 44 - 46.  
 XU Bin, YU Jing-mei. Research on self-controlled anti-icing de-icing blade structure based electric heating [J]. Applied Energy Technology 2012, 12: 44 - 46.

[4] Andrea G. Kraj, Eric L. Bibeau. Phases of icing on wind turbine blades characterized by ice accumulation [J]. Renewable energy, 2010, 35: 966 - 972.

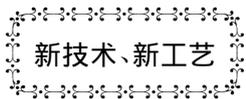
[5] 王 昆,白俊强,夏 露,等. 飞机热气防冰系统与冰脊预测的数值模拟[J]. 航空动力学报 2014, 11: 2694 - 2703.  
 WANG Kun, BAI Jun-qiang, XIA Lu, et al. Numerical simulation of aircraft anti-icing system heat and ice ridges forecast [J]. Journal of Aerospace Power 2014, 11: 2694 - 2703.

[6] 孙晓晶,陆启迪,黄典贵,等. 升力型垂直轴风力机翼型的选择[J]. 工程热物理学报 2012, 03: 408 - 410.  
 SUN Xiao-jing, LU QI-di, HUANG Dian-gui, et al. Airfoil choice for lift type vertical axis wind turbine [J]. Journal of engineering thermophysics 2012, 03: 408 - 410.

[7] 张礼达,任腊春,陈荣盛. 风力机叶片外形设计及三维实体建模研究[J]. 太阳能学报 2008, 09: 1177 - 1180.

- ZHANG Li-da ,REN La-chun ,CHEN Rong-sheng. 3D modeling study of wind turbine blade shape design [J]. Acta Energetica sinica 2009 06: 98 - 102.
- [8] 李少华,宋东辉,刘建红,等. 不同孔型平板气膜冷却的数值模拟[J]. 中国电机工程学报 2006 26(17): 112 - 116.  
LI Shao-hua ,SONG Dong-hui ,LIU Jian-hong ,et al. Numerical simulation of different groove plate film cooling [J]. Proceedings of The Csee 2006 26(17): 112 - 116.
- [9] 戴萍,林枫. 气膜孔形状对冷却效率影响的数值研究[J]. 动力工程 2009 29(2): 117 - 122.  
DAI Ping ,LIN Feng. The influence of gas film hole shape on the cooling [J]. Power Engineering 2009 29(2): 117 - 122.
- [10] 朱程香,王珑,孙志国,等. 风力机叶片翼型的结冰数值模拟研究[J]. 空气动力学学报 2011 04: 522 - 528  
ZHU Cheng-Xiang ,WANG Long ,SUN Zhi-guo ,et al. Numerical simulation study on wind turbine blade airfoil icing [J]. Acta Aerodynamica sinica 2011 04: 522 - 528.
- [11] 马林静,陈江,杜刚,等. 风力机翼型气动特性数值模拟[J]. 太阳能学报 2010 02: 203 - 209.  
MA Lin-jing ,CHEN Jiang ,DU Gang ,et al. Numerical simulation on wind turbine Airfoil aerodynamic characteristics [J]. Acta Energetica sinica 2010 02: 203 - 209.
- [12] 肖京平,陈立,许波峰,等. 1.5 MW 风力机气动性能研究[J]. 空气动力学学报 2011 04: 529 - 534.  
XIAO Jing-ping ,CHEN Li ,XU Bo-feng ,et al. Dynamic Performance research of 1.5MW wind turbine gas [J]. Aerodynamic Journal 2011 04: 529 - 534.
- [13] 赵克良,陆志良,丁力,等. 用于结冰风洞试验的混合翼设计[J]. 空气动力学学报 2013 06: 718 - 722.  
ZHAO Ke-liang ,LU Zhi-liang ,DING Li ,et al. Blended wing design for wind tunnel icing test [J]. Acta Aerodynamica sinica , 2013 06: 718 - 722.
- [14] 陈荣盛,张礼达,任腊春. 基于相似理论的风力机特性分析[J]. 水力发电 2008 06: 92 - 94.  
CHEN Rong-sheng ,ZHANG Li-da ,REN La-chun. Characteristic analysis of wind turbine based on similarity theory [J]. Hydroelectric power 2008 06: 92 - 94.
- [15] 李岩,迟媛,冯放,等. 垂直轴风力机叶片表面结冰的风洞试验[J]. 工程热物理学报 2012 11: 1872 - 1875.  
LI Yan ,CHI Yuan ,FENG Fang ,et al. Vertical axis wind turbine blade surface icing wind tunnel test [J]. Journal of engineering thermal physics 2012 11: 1872 - 1875.

(姜雪梅 编辑)



## 墨西哥正在建造联合循环电站

据《Gas Turbine World》2015年5月刊报道,作为推进它的能源改革计划的一个步骤,墨西哥正在建造先进的联合循环电站。

它将使用量先进的燃气轮机技术。Siemens 已获得了一个合同;供应 2 台 ST6 - 8000H 燃气轮机和 2 台发电机,用于在索诺拉州恩帕尔梅 1 号联合循环电站。在它于 2017 年 11 月开始商业运行时,该功率为 770 MW 电站将成为在拉丁美洲使用 H 级燃气轮机技术的第一个电站。

恩帕尔梅 1 台号站合同是 Siemens 在最近几个月获得的第 2 个合同。在 4 月,工程总承包商 Avanzia 给出一份设备定单:为图拉 1 号和 2 号电站提供 2 套 1 × 1 联合循环电站设备,这些电站的营运者是墨西哥国营 CFE 电力公司。这二套设备将具有 390 MW 的装机容量,是足够供给 300 000 个家庭用电。

在该合同下, Siemens 将供应 2 台 SGT6 - 5000F 燃气轮机和 2 台 SGEN6 - 1000 发电机。

(吉桂明 摘译)

studied by experimentally investigating combustion characteristics of 13 blended coals optimized by using the expert system of multivariate optimization in a drop tube furnace. The effects of coal fineness R90, excess air ratio and wall temperature in ignition temperature, ignition distance and combustion emissions are reported in detail in this paper. Results show none of 13 optimized coal blends has appreciable slag, indicating this multivariate optimization technology has successfully improved the slagging characteristics of coal via effective and optimized blending. **Key words:** power coal blending, drop tube furnace, combustion properties

油雾旋流燃烧的实验和计算分析 = **An Experimental and Computational Study of Spray Combustion in Swirling Flows** [刊 汉] LIU Zhen-jian, ZHU Min, LI Shao-shuai (Key Laboratory for Thermal science and Power Engineering of Ministry of Education / Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(2). -245-251

In the energy and power systems, swirl-stabilized spray combustion is a common combustion strategy. How to further improve the combustion efficiency and reduce emissions is the core interest of basic research and technology development. In this article, we used both experiments and numerical simulations to analyze the influence of swirl on flow field structure, droplet evaporation and combustion characteristics. The structure of cyclone flow field can be divided into three parts: the central recirculation zone and two kinds of helical vortex, which structure is affected by swirl number. With the increase of swirl number, the inner vortex becomes stronger, while the outer vortex becomes weaker. With the help of swirl, the oil droplets spread outward, evaporate more quickly and mix with air more efficiently, leading to higher fuel concentration in upstream and higher combustion efficiency. With the increase of Reynolds number, the central recirculation zone increases gradually and the length of flame becomes shorter. **Key words:** swirl-stabilized spray combustion, swirl number, central recirculation zone, helical vortex, numerical simulation

风力机叶片前缘单排孔射流成膜特性研究 = **Study on the Film Forming Characteristics of Single Row Jet Holes on the Leading Edge of Wind Turbine Blade** [刊 汉] YU Jing-mei, LIU Pan-pan, MENG Fan-dan (Liaoning Technology University, Mechanical Engineering, Fuxin, Liaoning, China, Post Code: 123000) CHEN Cheng (Yanshan Lake Power Generation Co. Ltd, Chaoyang, China, post code: 122000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(2). -252-258

For the icing problems on the leading edge of large-scale vertical axis wind turbine blade airfoil under cold weather conditions, this paper put forward a new solution – gas film heating method. With film holes created on the leading edge of wind turbine blade airfoil, three dimensional static blade was studied numerically, and the filming conditions were scrutinized to determine hole diameter and pitch size. The unsteady state numerical simulations under varying conditions were also performed to analyze the three-dimensional wind turbine aerodynamic characteristics, determine the optimum operating conditions, and also observe the corresponding filming. Finally, a scaled-down prototype was used for experimental test and analysis, and the experimental results are compared to the numerical simulation results. It is found that the trend of the average torque with respect to the tip speed ratio is consistent. These results indicate that the openings in airfoil not only can play a positive role in controlling ice, but also have negligible effect in the aerodynamic performance of wind turbine blade if they are created appropriately. **Key words:** wind turbine blade, gas film heating, aerodynamic characteristics, wind energy utilization rate

玉米秸焦低温氧化及动力学特性的恒温量热分析 = **Low Temperature Exothermal Oxidation and Isothermal Calorimetric Analysis of Kinetic Characteristics of Corn Cob Chars** [刊 汉] FAN Peng-hui, FAN Shuang, SHENG Chang-dong ( School of energy and Environment, Southeast University, Jiangsu Provincial Key Laboratory of Solar Science and Technology, Nanjing, Jiangsu, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2016, 31( 2) . – 259 – 263

To address the self-heating and low temperature oxidation problems in biomass chars, experimental studies on corn cob chars ( 250 °C and 500 °C) and its raw material were carried out under temperatures close to room temperature ( 35 – 65 °C) based on isothermal calorimetric analysis, and low temperature exothermal oxidation and kinetic characteristics of these samples were presented in this paper. Results show that these three samples under different temperatures have similar trend of heat rate variation and similar effect of reaction temperature, that is, the maximum rate of heat release and the cumulative heat for a same duration increase significantly as reaction temperature increases. It is shown in the kinetic analysis that the baking char ( namely 250 °C char) has nearly same activation energy as the raw sample, but the self-heating tendency decreases because of the lower pre-exponential factor. However, the char prepared at 500 °C has higher activation energy and stronger propensity of self-heating or spontaneous combustion due to the fact that the exothermal reaction is sensitive to temperature. **Key words:** corn cob char, low-temperature oxidation, heat release characteristics, kinetic parameters, isothermal calorimetric analysis