

汽轮机静叶栅中水滴运动与沉积规律的数值研究

李春国, 王新军, 王贤钢, 孙弼

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 在 FLUENT 计算流体力学软件中应用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型、近壁面双层区模型和拉格朗日法对某 300 MW 汽轮机末级静叶水滴沉积进行了数值模拟。结果表明:大水滴不能完全跟随流线运动,运动轨迹偏向叶片压力面;直径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的水滴以湍流扩散的方式沉积在叶片表面上,直径为 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 的水滴在湍流扩散和惯性的综合作用下沉积,直径大于 $5\ \mu\text{m}$ 的水滴的沉积受到湍流扩散作用的影响很小,主要在惯性作用下沉积;直径小于 $1.6\ \mu\text{m}$ 的水滴主要沉积在静叶的压力面上靠近尾缘的一小段区域和吸力面上靠近尾缘的一大段区域,直径大于 $1.6\ \mu\text{m}$ 的水滴主要沉积在压力面尾缘附近和吸力面前缘处。研究水滴沉积分布对于设计静叶去湿和减少动叶侵蚀具有参考作用。

关键词: 拉格朗日法;汽轮机;湍流扩散;惯性;沉积

中图分类号: TK263 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1076-05

Numerical Investigation of Movement and Deposition of Water Droplets on Steam Turbine Stator Cascade

LI Chunguo, WANG Xinjun, WANG Xiangang, SUN Bi

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The numerical simulation of deposition of water droplets on the stator blades of the final stage of a 300 MW steam turbine was performed with FLUENT using RNG $k-\epsilon$ turbulence model, the two-layer zonal near-wall model and the Lagrangian method. The results show that the coarse water droplets fail to follow the vapor streamline exactly and lean towards the pressure side of the blade. The water droplet deposits on the blade surface for a diameter of less than $1\ \mu\text{m}$ by turbulent diffusion, for $1\sim 5\ \mu\text{m}$, by combination of turbulent diffusion and inertia, and for larger than $5\ \mu\text{m}$, by inertia mostly. The water droplet less than $1.6\ \mu\text{m}$ in diameter deposits in the small area of the pressure side and in the large area of the suction side near the trailing. The others deposit in the area of the pressure side near the trailing and in the area of the suction side near the leading.

Keywords: Lagrangian method; turbine; turbulent diffusion; inertia; deposit

蒸汽在汽轮机叶栅通道中膨胀到湿蒸汽区,会发生自发凝结而生成大量的微小水滴,即一次水滴,其直径约为 $0.01\sim 1.0\ \mu\text{m}$ ^[1]。一次水滴占湿蒸汽中液相质量的 90% 左右,其中一小部分由于惯性和湍流扩散作用沉积到叶片表面形成水膜或者溪流,在蒸汽拽力的作用下向叶片尾缘流动,并在尾缘处被

汽流夹带、撕裂形成直径小于 $400\ \mu\text{m}$ 的大水滴,即二次水滴。与一次水滴相比,二次水滴的数目很少,但单个水滴的质量较大,很难加速到气流速度,最后以较高的相对速度撞击到动叶上引起严重的侵蚀。对于运行在湿蒸汽区的汽轮机,这种侵蚀很明显。在英国,仅由于透平中湿度引起效率降低而造成的经

济损失每年就达到了5 000万英镑.美国59家电厂中有31家曾经发生过低压级组叶片水蚀断裂事故,年损失高达 26×10^3 万美元^[2],由此可见电力和动力工业中湿蒸汽流动问题的重要性.

最早关于微粒在汽轮机叶栅中沉积的试验研究是由Parker等人^[1,3]完成的,他们采用荧光微粒代替水滴在风洞中进行试验,得到的吸力面沉积率低于0.1%,而压力面的沉积率很小,可以忽略不计.Yau和Young^[4]采用准三维无黏流场和二维边界层计算对某500 MW核电湿蒸汽汽轮机高压缸的某级静叶和低压缸末级静叶进行了计算,结果是直径 d 为 $0.2 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 的水滴在叶片上的沉积率 ψ 约为0.5%~7%.沉积率 ψ 定义为沉积在叶片上的水滴数与进口总水滴数之比.Hesham和Haselbacher^[5]应用CFD商业软件FLUENT 4、RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和壁面双层区模型较好地模拟了Parker等人^[3]的试验,计算结果与试验值吻合良好.

本文在Hesham研究^[5]的基础上,应用FLUENT 6.1 CFD软件进一步考核了计算模型,研究了某300 MW汽轮机末级静栅中的水滴运动和沉积规律,为进一步研究静叶的去湿和减少动叶侵蚀提供参考.

1 沉积理论

颗粒在流场中受到的作用力来自惯性、湍流扩散、布朗扩散、重力、热泳力、电泳力、Saffman升力、Magnus力等.颗粒的含量较低,电泳力可忽略不计;流场大部分区域颗粒没有旋转,Magnus力并不重要;直径大于 $0.03 \mu\text{m}$ 的颗粒主要受到湍流的强烈影响,布朗力可忽略不计;同时本文也不考虑重力以及与温度梯度相反的热泳力.因此,颗粒在流场中受到的主要作用力是惯性力、湍流扩散的作用力以及横向速度梯度引起的Saffman升力.颗粒主要以2种方式沉积到叶片表面:湍流扩散沉积和惯性沉积.湍流扩散沉积是小颗粒在气流湍流涡的随机脉动作用力下进入边界层且运动到叶片表面而沉积,惯性沉积是大颗粒随着气流运动时由于惯性的作用其并不能完全跟随气流流线运动,而在惯性作用下撞击到叶片表面并沉积下来.

1.1 沉积模型

颗粒沉积的理论研究可以采用欧拉方法和拉格朗日方法.拉格朗日方法可求解每个颗粒在湍流随机脉动力作用下的瞬态方程,虽然计算速度慢,但与欧拉方法相比可提供更详细、更真实的结果.

在拉格朗日参考系下,颗粒的运动方程为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + F_a \quad (1)$$

式中: $F_D(u - u_p)$ 为单位质量颗粒受到的拽力,其中

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}$$

式中: u 为流体的相对速度; u_p 为颗粒速度; μ 为流体动力黏度; ρ 为流体密度; ρ_p 为颗粒密度; d_p 为颗粒直径; F_a 为作用于颗粒上的附加力,如Saffman升力,热泳力等; C_D 为拽力系数; Re 为相对雷诺数,定义为

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (2)$$

1.2 湍流扩散

采用随机轨道模型模拟湍流对颗粒运动轨迹的影响,颗粒轨道方程中的流体速度为瞬时速度

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v' \quad (3)$$

式中:流体脉动速度分量 u' 和 v' 是时间的分段常数函数,在流体涡的特征生存时间间隔内,这个脉动保持为常量,且 u' 和 v' 假设遵循高斯概率分布,即

$$u' = \zeta(u'^2)^{1/2}, \quad v' = \zeta(v'^2)^{1/2} \quad (4)$$

式中: ζ 为服从正态分布的随机数; $(u'^2)^{1/2}$ 和 $(v'^2)^{1/2}$ 为当地速度脉动的雷诺应力.此时,流场中每一处的湍流动能 k 都是已知量,对于 $k-\epsilon$, $k-\omega$ 以及相应的衍生模型,雷诺应力分量为

$$(u'^2)^{1/2} = (v'^2)^{1/2} = \left(\frac{2k}{3}\right)^{1/2}$$

2 模型考核

图1给出了单位面积沉积率 ϕ_a 在叶片表面的分布,横坐标 x 为相对弧长.Hesham^[6]应用CFD商业软件FLUENT 4、RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和壁面双层区模型以及拉格朗日法模拟了Parker等人的试验,Menguturk等人^[7]使用基于颗粒湍流扩散的欧拉法做了同样的工作,Hesham^[3]的计算结果与试验数据吻合较好.但是,由于试验采用的工质为空气,并用固体颗粒代替水滴,为了研究汽轮机静叶水滴的沉积规律,有必要进一步考核上述模型.

Yau和Young^[4]采用准三维无黏流场和二维边界层计算得到了叶片表面的剪应力分布,从而计算小水滴在叶片上的沉积率,并应用该理论方法对某500 MW汽轮机的低压缸末级静叶进行了计算,结果是直径为 $0.2 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 的水滴在叶片表面的沉积率为0.5%~7%,如图2所示.本文计算了300 MW汽轮机末静叶水滴的沉积率,与文献^[4]相比

可看出:虽然采用的叶片型线、边界条件和数值算法不同,但2种计算方法得到的沉积率大小相近,沉积率随水滴直径变化的趋势也相似。由此可见,本文和Hesham^[3]等人采用的计算模型可以较好地模拟汽轮机静叶栅中水滴的运动。

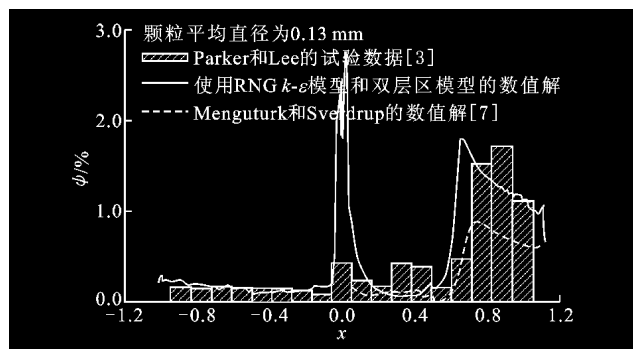


图1 数值结果与试验结果的比较^[6]

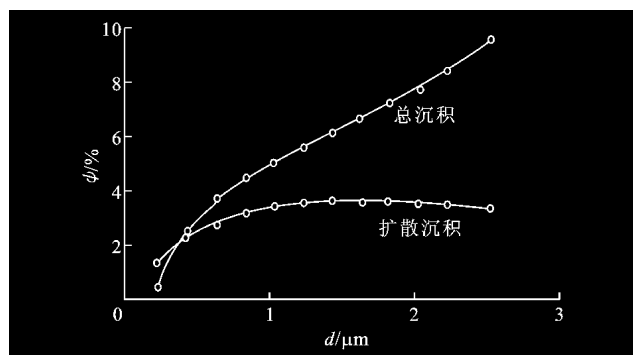


图2 水滴在低压汽轮机末级静叶上的沉积规律^[4]

3 水滴在静叶栅通道中的运动与沉积规律

本文对某汽轮机厂生产的300 MW汽轮机低压末级静叶叶高75%处的截面进行了计算。叶片几何参数:叶宽76 mm,弦长113 mm,节距78 mm。

采用分块结构化网格,并对壁面附近的网格进行加密,如图3所示。网格节点数约为2万,选择密网格是为了获得与网格无关的流场和水滴轨迹。

边界条件按照设计参数给定:进口参数总压为0.386 MPa、总温为348.8 K;出口参数静压为0.231 MPa;湍流强度为3.67%,水力直径为0.078 m。

3.1 湍流扩散对水滴运动轨迹的影响

在同一入射点,分别射出直径为0.05、0.5、5 μm的水滴50个,图4给出了它们在惯性和湍流作

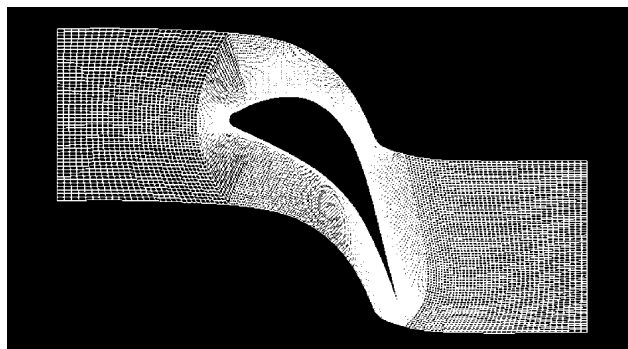


图3 平面叶栅网格示意图

用下的运动轨迹。直径为0.05、0.5 μm的小水滴受到湍流的影响较大,水滴运动轨迹分散,但由于质量小,能较好地跟随蒸汽流线运动。直径为5 μm的大水滴由于质量较大,受到湍流的影响较小,运动轨迹比较集中,在较大的惯性作用下不能跟随流线运动,所以在出口处偏向压力面。

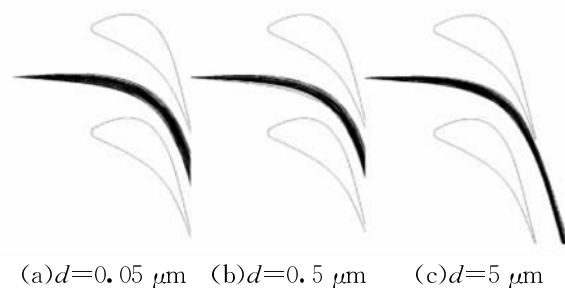


图4 水滴的运动轨迹

3.2 沉积率与水滴直径的关系

由于水滴始终都会受到惯性的作用,所以无法计算不包含惯性作用的沉积率。为了分析湍流扩散对沉积的影响,对某直径的水滴,定义湍流扩散沉积率为总沉积率与惯性沉积率之差。

对直径为0.05~6 μm的水滴进行计算,即沿入口节距方向均匀分布1000个水滴入射点,分别对每个入射水滴的运动轨迹计算100次,这样就能很好地考虑湍流对颗粒的随机性影响,此时得到的是包含湍流扩散和惯性作用的总沉积率。当不考虑湍流扩散影响时,沿节距方向均布10000个水滴入射点,对每个入射水滴只计算1次,这样得到的是惯性沉积率。

从图5可以看出以下几点。

(1)直径小于1 μm的水滴惯性很小,在汽流中具有良好的跟随性,惯性沉积率为0,湍流扩散主导着水滴的沉积。随着水滴直径的增大,湍流扩散对水滴的作用力快速增大,表现为沉积率快速增大。当水滴直径大于0.5 μm后,湍流扩散作用力随着水滴

直径的增大而略有减小,且下降的吸力面总沉积率与升高的压力面总沉积率相互抵消(见图6),因此总沉积率曲线平缓并略有下降。

(2)当水滴直径为 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 时,湍流扩散和惯性共同影响水滴的沉积,沉积方式为湍流扩散与惯性沉积。当水滴直径小于 $1.4\ \mu\text{m}$ 时,惯性作用力的增加并不能完全抵消湍流扩散作用力的持续减少,总沉积率保持略微减小,并在水滴直径为 $1.4\ \mu\text{m}$ 时达到极小值(ψ 为 2.76%)。当水滴直径为 $1.6\ \mu\text{m}$ 时,惯性沉积率与湍流扩散沉积率曲线相交,之后快速增大的惯性作用力对沉积起着主导作用,沉积率快速增大。

(3)当水滴直径大于 $5\ \mu\text{m}$ 后,湍流扩散对沉积的影响相对于惯性的影响可以忽略不计,水滴主要以惯性的方式进行沉积。

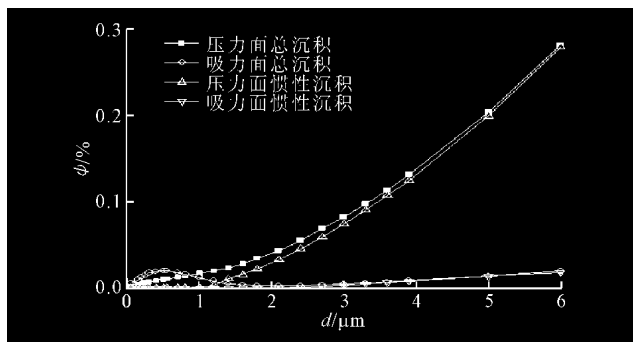


图5 沉积率与水滴直径的关系曲线

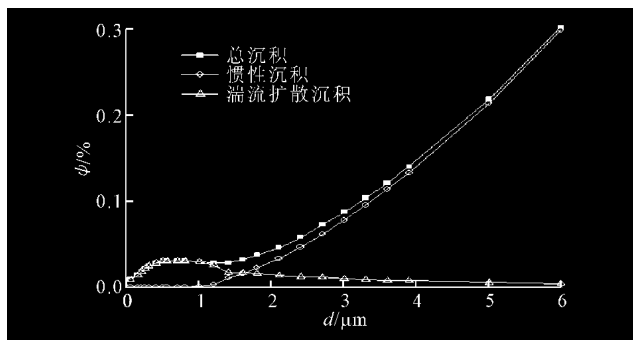


图6 总沉积率与水滴直径的关系曲线

3.3 压力面与吸力面沉积率的比较

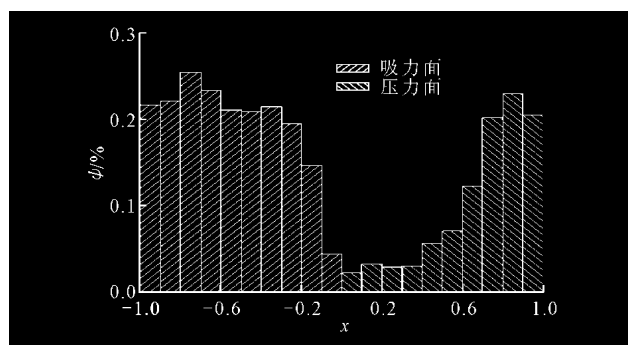
在汽轮机空心静叶的压力面和吸力面合适的位置开设抽吸缝隙,利用缝隙内、外压差可以抽除静叶表面上的流动水膜或溪流,减少水膜或溪流在静叶出口边由于撕裂和二次雾化而形成的大水滴的数目,从而达到防止或减轻动叶侵蚀的目的。分析水滴在静叶压力面和吸力面上的沉积位置对于去湿具有参考价值。

当水滴直径为 $0.5\ \mu\text{m}$ 时,吸力面的沉积率达到最大值(ψ 为 2%)(见图6),主要沉积位置是靠近

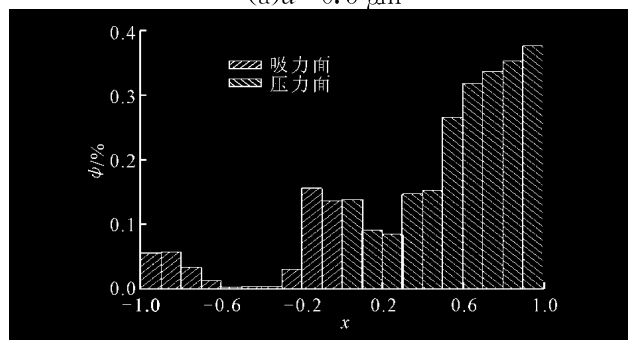
尾缘的一大段区域内。这是因为吸力面边界层转捩点在相对弧长 $x=0.2$ 处(见图7a),离前缘比较近,该点下游一大段区域内湍流作用较强,沉积率较高。在压力面,边界层转捩位于相对弧长 $x=0.7$ 处(见图7a),湍流扩散作用较强的区域比吸力面的小,所以总沉积率也比吸力面的小。

当水滴直径大于 $0.5\ \mu\text{m}$ 时,随着水滴直径的增大,湍流扩散对水滴的作用力减弱,吸力面总沉积率减小(见图6),比较图7a与图7b还可以发现吸力面沉积率在减小。当水滴直径为 $1.9\ \mu\text{m}$ 时,吸力面沉积率达到最小值(ψ 为 0.22%),之后吸力面总沉积率开始增加。这是因为虽然湍流扩散作用持续减弱,但惯性作用却在水滴直径大于 $1\ \mu\text{m}$ 时开始影响沉积率且这种影响力持续增大,并影响到了吸力面沉积率的变化。比较图7b和图7c可以发现,吸力面前缘附近沉积率增加,这是由惯性沉积作用增大引起的。

随着水滴直径的增大,压力面沉积率持续增加,在水滴直径为 $0.8\ \mu\text{m}$ 时超过了吸力面沉积率(见图6)。水滴在压力面上的主要沉积位置在尾缘附近(见图7)。当水滴直径小于 $1\ \mu\text{m}$ 时,湍流扩散沉积起主要作用,边界层转捩靠近尾缘,因而压力面的主要沉积区域靠近尾缘;当水滴直径大于 $1.6\ \mu\text{m}$ 时,惯性作用支配着沉积,主要的沉积位置在尾缘附近的一大段区域。



(a) $d=0.5\ \mu\text{m}$



(b) $d=1.4\ \mu\text{m}$

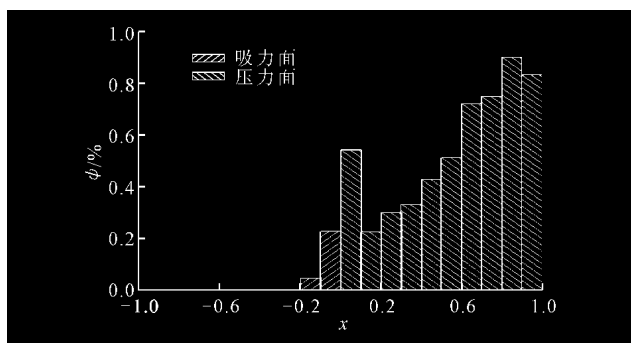
(c) $d=2.4 \mu\text{m}$

图7 沉积率在压力面和吸力面的分布

4 结 论

(1) 低压汽轮机中水滴大小对湍流扩散沉积率的影响较大,边界层转捩点对湍流扩散沉积在叶片表面上的位置影响较大。

(2) 直径小于 $1 \mu\text{m}$ 的水滴以湍流扩散的方式沉积,惯性沉积率为 0。在压力面和吸力面的沉积率均没有超过 2%。压力面的主要沉积位置为靠近尾缘的一小段区域,而吸力面的主要沉积位置为靠近尾缘的一大段区域。

(3) 当水滴直径大于 $1.6 \mu\text{m}$ 时,惯性对沉积的影响超过了湍流扩散的影响;当水滴直径大于 $5 \mu\text{m}$ 时,沉积方式为惯性沉积,压力面的沉积位置靠近尾缘处,而吸力面的主要沉积位置在前缘处。

参考文献:

[1] PARKER G J, RYLEY D J. Equipment and tech-

niques for studying the deposition of sub-micron particles on turbine blades [J]. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, 1969, 184(3): 43-51.

[2] 李亮.存在自发凝结的湿蒸汽两相非平衡凝结流动数值研究 [D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2002.

[3] PARKER G J, LEE P. Studies of the deposition of sub-micro particles on turbine blades [J]. Proceeding of Institute Mechanical Engineers, 1972, 186(38): 519-526.

[4] YAU K K, YOUNG J B. The deposition of fog droplets on steam turbine blades by turbulent diffusion [J]. Journal of Turbomachinery, 1987, 109(33): 429-435.

[5] HESHMAN E, HERMANN H. Effect of turbulence modeling on particle dispersion and deposition on compressor and turbine blade surface [C]// ASME Proceeding of ASME Turboexpo 2000. Munich, Germany: ASME, 2000: 1-8.

[6] HESHMAN E. Modeling particle deposition on compressor and turbine blade surfaces [D]. Vienna, Austria: Vienna University, 2001.

[7] MENGUTURK M, SVERDRUP E F. A theory for fine particle deposition in two-dimensional boundary layer flows and application to gas turbines [J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1982, 104(1): 69-76.

(编辑 王焕雪)

孙军教授主持的“新型智能材料研究”项目获第 12 次 中日政府间科技合作协定支持

金属材料强度国家重点实验室孙军教授与日本国立物质材料研究所任晓兵教授合作申报的“新型智能材料研究”项目获得第 12 次中日政府间科技合作协定的支持。

本项目旨在双方已处于国际领先水平的前期合作研究基础上,进一步研究晶体缺陷导致形状记忆合金体系出现的一些新的、奇异现象,揭示其物理机制和影响因素,并尝试研发一种新型的具有形状记忆效应和超弹性的非马氏体合金和一种高强度高韧性的高阻尼材料,拓宽智能材料的理论研究以及实际应用领域,并就这些新现象在下一代微电子领域的应用进行一些前瞻性的探索。

来源:交大新闻网