

超常参数条件下汽固两相流动的 相似与模化方法探究

王顺森, 刘观伟, 毛靖儒
(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 基于相似与模化理论和三维数值模拟方法, 对超常参数汽轮机调节级喷嘴内汽固两相模化试验方法进行了研究. 结果表明: 马赫数和斯托克斯数(Stk)是两相流动的决定性相似准则, 其对粒子与壁面撞击速度的模化误差小于5%, 撞击角度的模化误差小于3°; 经过多种参数组合试验才能筛选出实现 Stk 在相应位置对应相等的数据, 数值模拟预测可减少试验模化参数选择的盲目性. 对比不同反弹模型论证了粒子反弹对冲蚀喷嘴壁面影响不大, 偏差小于3%. 该研究扩展了汽固两相流模化理论在超常参数条件下的应用.

关键词: 模化试验; 相似准则; 汽固两相流; 数值模拟

中图分类号: TK263.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)03-0279-06

Exploration on Method of Simulation and Modeling for High-Velocity Steam-Solid Two-Phase Flow in Supernormal Parameters

Wang Shunsen, Liu Guanwei, Mao Jingru
(Institute of turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on modeling theory and three-dimension numerical simulation, a modeling test method about the steam-solid two-phase flow within the regulating stage nozzles of supernormal parameter steam turbine was investigated. The results show that the Mach number and Stokes number are decisive similarity criterion, and the modeling errors of the particle impacting velocity and angle on nozzle wall are less than 5% and 3°, respectively. The final results meeting the modeling demands have to be selected from a range of experiments with different parameters. The forecasting of numerical simulation provides a good method to optimize experiment parameters. In addition, the influence of particles rebound on solid particle erosion (SPE) is very weak in nozzle, and maximum deviation of SPE caused by different particles rebound models is 3%.

Keywords: modeling test; similarity criterion; steam-solid two-phase flow; numerical simulation

汽轮机通流部分固体微粒冲蚀(SPE)在超常参数, 即超临界和超超临界机组中普遍存在, 已严重影响汽轮机的安全、稳定和经济运行^[1]. 根据国内外的运行经验, 调节级的喷嘴冲蚀最为严重^[2-3]. 要降低或消除 SPE, 必须对粒子在喷嘴通道内的运动特性进行深入、全面的研究, 特别是试验研究.

单相或低速气固两相流动的模化方法相对较成

熟, 但高速汽固两相流动可以依据的模化理论成果和应用研究还很缺乏. 本文通过相似理论和三维数值模拟互补的新思路, 对超超临界汽轮机调节级端壁收缩喷嘴内的固体颗粒运动规律的模化试验方法进行了探索, 扩展了汽固两相流模化理论在高雷诺数流动条件下的应用.

1 高速气固两相流动的相似与模化

1.1 研究对象及模化准则分析

依据相似理论,凡同一类物理现象,当单值条件相似且由单值条件中的物理量组成的相似准则对应相等时,则这些现象必定相似^[4].然而,在相似与模化中,满足所有相似准则对应相等,也就变成了试验和真实条件完全相同,等于没有模化.因此,实际模化总是根据研究对象寻求主要的、对全局起决定性作用的因素,将那些居于次要地位、起局部作用的因素只作近似处理或忽略不计.本文模化的喷嘴型线如图1所示,几何参数见表1.

表1 喷嘴的主要几何参数

弦长 b/mm	叶宽 B/mm	节距 t/mm	子午 收缩比	展弦比	喉宽/ mm	喷嘴数量
100.7	76.5	49.8	0.74	0.38	15.7	54



图1 喷嘴型线图

稀相气固两相流因相间无相互作用,因此可写出各相运动方程并分别模化.这样,只要保证气相和固相分别相似,就能使模型和实物中的固粒运动轨迹相似^[5].

对于进入雷诺数自模化区的可压缩气流,以马赫数 Ma 作为决定性相似准则已能基本满足模化的充分条件和工程需要,其有效性得到了大量的实践检验.有关这方面的研究详见文献^[4,6-7].本文重点对高温高速条件下的粒子运动进行模化.

图1所示的喷嘴进口压力为25 MPa,温度为600 °C,出口马赫数为0.98.喷嘴内的固体微粒为稀相,绝大多数微粒尺寸小于100 μm ^[8],但考虑到机组启动时可能会有部分稍大一些的颗粒进入汽道,本文选取颗粒尺寸范围为10~150 μm .

粒子在高速气流中主要受到下面各种力的共同作用^[9]

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{SD}} + \mathbf{F}_{\text{gf}} + \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_{\text{vm}} + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_{\text{ma}} + \mathbf{F}_s \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}_{\text{SD}}$ 为Stokes阻力; $\mathbf{F}_{\text{gf}}$ 为重力和浮力; $\mathbf{F}_p$ 为压力梯度力; $\mathbf{F}_{\text{vm}}$ 为附加质量力; $\mathbf{F}_B$ 为Basset力; $\mathbf{F}_{\text{ma}}$ 为Magnus力; $\mathbf{F}_s$ 为Saffman力.选取喷嘴通道中部截面参数进行量级分析,以确定以下对粒子运动起决定性作用的力:汽流动力黏性系数 μ 为 $3.4 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;汽流密度 ρ_f 为 $50 \text{ kg}/\text{m}^3$;粒子与气流的滑移速度 $|\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f|$ 约为 100 m/s ,其中 $\mathbf{u}_p$ 和 $\mathbf{u}_f$ 分别为粒子速度和气流速度, $d(\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p)/dt$ 为 $3 \times 10^6 \text{ m/s}^2$.此外,取粒子直径 $d_p = 50 \mu\text{m}$,密度 ρ_p 为 $5000 \text{ kg}/\text{m}^3$,沿流动方向的平均压力梯度 $|\partial p/\partial x|$ 为 $6 \times 10^7 \text{ Pa/m}$,粒子旋转速度 ω 取 10^4 量级^[9],下面是各种力的量级分析结果

$$\mathbf{F}_{\text{SD}} = \frac{1}{8} C_D \rho_f \pi d_p^2 |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f| (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f) \quad (2)$$

其值约为 3×10^{-4}

$$\mathbf{F}_{\text{gf}} = \frac{1}{6} \pi d_p^3 (\rho_p - \rho_f) \mathbf{g}, \quad \text{其值约为 } 3 \times 10^{-9}$$

$$\mathbf{F}_p = -\frac{1}{6} \pi d_p^3 \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial x}, \quad \text{其值约为 } 4 \times 10^{-6}$$

$$\mathbf{F}_{\text{vm}} = -\frac{1}{12} \pi \rho_f d_p^3 \frac{d(\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p)}{dt}, \quad \text{其值约为 } 5 \times 10^{-6}$$

$$\mathbf{F}_{\text{ma}} = \frac{1}{8} \pi \rho_f d_p^3 \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p), \quad \text{其值约为 } 2.5 \times 10^{-6}$$

$$\mathbf{F}_s = 1.61 (\mu \rho_f)^{0.5} d_p^2 (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) \left| \frac{d\mathbf{u}_f}{dy} \right|^{0.5}$$

其值约为 1.7×10^{-6}

$$\mathbf{F}_B = \frac{3}{2} d_p^2 (\pi \rho_f \mu)^{1/2} \int_0^t \frac{d(\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p)}{dt(t-\tau)^{1/2}} d\tau \quad (3)$$

其值小于 5×10^{-6}

Basset力的方程为一个奇异积分,对其直接求解非常困难,本文参考文献^[10]的研究结论,当粒子斯托克斯时间 $\tau_s = \rho_p d_p^2 / 18\mu$ 小于式(3)中的积分上限时, $|\mathbf{F}_B| < |\mathbf{F}_{\text{vm}}|$,以此得到 $\mathbf{F}_B$ 的量级.

计算可得Stokes阻力占气流对粒子所有力的95%以上,对粒子的运动特性具有决定性作用,因此式(1)可以简化为

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{SD}} \quad (4)$$

按照牛顿第二定律,并结合式(2)、式(4),即得粒子运动方程

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{1}{8} C_D \rho_f \pi d_p^2 |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f| (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f) \quad (5)$$

式中: m_p 为粒子的质量; C_D 为阻力系数,其与颗粒雷诺数 Re_p 的关系如下

$$C_D = \frac{C}{Re_p^n}, \quad Re_p = \frac{\rho_f |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p| d_p}{\mu}$$

其中: C 和 n 为确定阻力系数的常数,它们与颗粒雷诺数 Re_p 的关系如下:

当 $1 < Re_p < 50$ 时,取 $n=0.725, C=23.4$;

当 $50 < Re_p < 700$ 时,取 $n=0.425, C=7.8$;

当 $700 < Re_p < 2 \times 10^5$ 时,取 $n=0, C=0.48$.

对式(5)使用相似准则分析中的积分类比法,可导出

$$Stk = \frac{\rho_p d_p}{C_D \rho_f l}$$

式中: l 取当地喷嘴通道截面的当量直径.综合上述分析,最终确定两相模化的决定性相似准则数:气相为 Ma ,颗粒相为 Stk .

根据数值模拟结果的估算,原型蒸汽工况的 $C_D=0.48$,即使 u_p-u_f 未知,也可得其 Stk ,而模化工况的 $Re_p < 700, C_D$ 是变量,因此无法满足 Stk 在原型和模型所有对应截面上均相等的条件.在这种情况下,模化设计的原则是保证最关心区域的 Stk 对应相等.考虑到喷嘴冲蚀主要发生在 $0.4 < \lambda < 1.0$ 段,本文取其中段 $\lambda=0.7$ 处的 Stk 为基准,调整其他参数保证模型和原型在该区内对应截面上的 Stk 的偏差小于5%.

模化工况的 u_p-u_f 在试验后才能准确确定,因此试验前只能用三维数值计算来预测模化参数.在模化研究中,需要经过多种参数组合进行试验,最终从中筛选出体现 Stk 在模型和原型对应截面相等的试验数据.这也正是超常参数两相流动模化研究的难点所在.

1.2 试验模型和单值性条件相似分析

在满足决定性相似准则相等的同时,还应满足单值性条件相似,这样才能确保2种现象相似.

(1)几何相似与 Re . Re 反映了气体微团所受惯性力与黏性力的相对关系.对汽轮机叶栅来说,当 $Re > (2 \sim 5) \times 10^5$ 时,就认为进入自模化区^[7].在该试验中,当实物与模型在几何尺寸上为1:1时可满足上述条件,为简化试验,本文选用与原型1:1的试验模型.

(2)物理条件相似.针对研究对象,物理条件相似主要包括气体的绝热指数($\kappa=C_p/C_v$)相等和粒子与壁面碰撞的反弹特性相同.本模化试验和原型的喷嘴通道内部均为亚音速流动.根据已有研究,在亚音速流动条件下,用 $\kappa=1.4$ 的空气来代替 $\kappa=1.3$ 的过热蒸汽,对模化结果造成的误差在2%以内.因此,可用空气来代替蒸汽进行试验^[8].关于粒子与壁面的反弹特性将在后面详细介绍.

(3)边界条件相似.通过试验段进出、口过渡段的模化设计来满足实物的进、出口条件.

2 模化试验参数的对比性数值分析

从1995年以来,俞茂铮教授的课题组一直在开展汽轮机调节级喷嘴内的高速汽固两相流数值计算研究,计算方法得到不断的完善,计算结果和结论也较好地解释了汽轮机运行中的一些现象.

然而,对超常参数下的高速气固两相流试验研究在国内尚属首次,国外可参考的相关文献也很稀少.另外,这种试验研究耗资巨大,不可能通过大量的试验来验证模化参数.在这种条件下,发挥数值模拟方法更能体现单一参数作用的优势,作为本研究的一个补充环节还是有意义的.实际上,用数值模拟方法对汽轮机通流部分单相场进行计算目前已比较成熟,在工程上已有广泛的应用.

对模化试验参数进行对比性数值分析的基本思路是:利用三维数值计算首先获得实际蒸汽参数和模化试验参数下的2种单相流场,以此作为各自粒子受力及运动的初场条件;使用式(1)对粒子在整个喷嘴通道内的运动情况进行计算,对比2种参数下粒子的运动特性,考核和预测模化准则数选择的合理性.

2.1 数值模拟方法

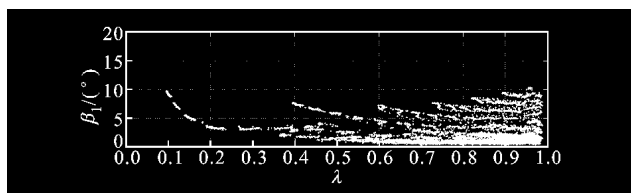
数值计算的模型与试验段形状和尺寸完全相同,网格数约为40~80万.近壁区采用壁面函数法处理,为满足网格第一个内节点与壁面间的归一化距离 y^+ 为30~200的要求,在喷嘴壁面周围进行了网格加密.

本文采用标准 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型,首先用耦合隐式算法和二阶迎风格式获得单相流场,然后在进口截面处均匀撒播大量的粒子,用分散颗粒群轨迹模型双向耦合方法计算其运动轨迹,并统计其结果,从而获得统计意义下的粒子群进入汽道后与叶栅表面的撞击位置、角度和速度等参数与结构参数之间的关系.上述方法参照了文献[11-12].

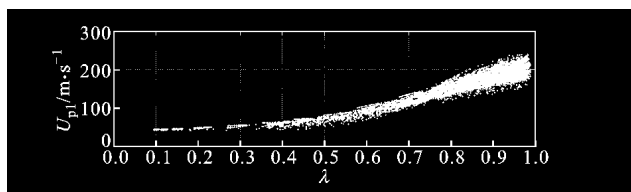
2.2 数值模拟方法可靠性的试验验证

试验在作者设计和搭建的高温高速气固两相流试验台上进行.试验喷嘴进口气流压力为0.185 MPa,温度为40℃,出口马赫数为0.98.根据 Stk 相似准则数相等的原则,选定模化试验用的粒子密度为2 250 kg/m³的空心玻璃珠.粒子直径用Malvern粒度分析仪测量,粒径平均值为3.86 μm, Rosin-Rammler分布指数为4.95,其最小和最大直

径分别为 $1.22\ \mu\text{m}$ 和 $6.18\ \mu\text{m}$. 用粒子速度场仪 PIV 测试技术获得喷嘴通道内的粒子速度场, 然后对撞击压力面的粒子速度进行统计和分析处理, 得到粒子对喷嘴壁面的撞击速度 U_{pl} 、撞击角度 β_1 与撞击位置之间的关系. 关于试验测试方法详见文献 [11]. 图 2 和图 3 分别为该典型工况下的数值模拟和试验结果, 横坐标为相对轴向位置 λ , 是指在叶宽方向喷嘴压力面上各点距进气边的距离与叶宽 B 的比值.

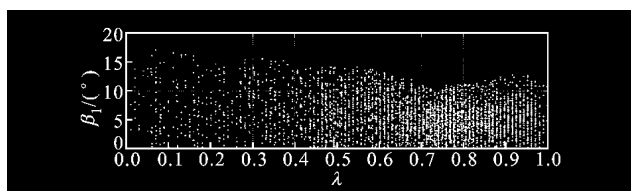


(a) β_1 沿 λ 的变化曲线

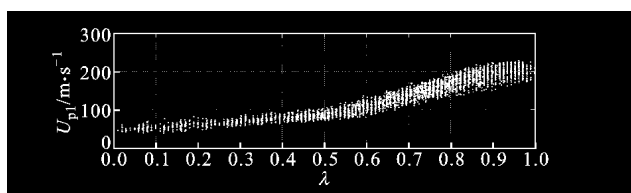


(b) U_{pl} 沿 λ 变化曲线

图 2 典型工况下 β_1 和 U_{pl} 随 λ 的变化的数值计算结果



(a) β_1 沿 λ 的变化曲线



(b) U_{pl} 沿 λ 变化曲线

图 3 典型工况下 β_1 和 U_{pl} 随 λ 的变化的试验结果

从图 2、图 3 的对比可以看出, 粒子撞击速度沿 λ 的分布基本相同, 试验比计算的撞击角度分布更均匀, 但都在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内. 这是因为数值计算的粒子尺寸分布不像试验用的粒子那么连续. 此外, 根据作者对喷嘴材料冲蚀特性的研究结果, 冲蚀率与粒子撞击速度的 2.5 次方成正比, 最大冲蚀率对应的撞击角度为 25° , 而试验与数值计算得到的撞击

角度均小于材料的最大冲蚀角度, 因此 2 种结果的差异对实际应用影响并不大. 综合以上分析, 本文认为数值模拟能基本反映试验的特征, 可用来对模化参数选择的合理性进行预测.

2.3 模化参数选择合理性的数值验证

喷嘴进口实际蒸汽压力为 25 MPa, 温度为 600°C , 模化后的空气压力为 0.185 MPa, 温度为 40°C , 出口马赫数均为 0.98, 其他参数见表 2. 试验粒子为空心玻璃珠, 其与壁面的反弹特性如下^[13]

$$\begin{aligned} U_{\text{p2}}/U_{\text{pl}} &= 0.989 - 2.005\beta_1 + \\ &3.300\beta_1^2 - 1.743\beta_1^3 \\ \beta_2/\beta_1 &= 0.9554 + 2.8205\beta_1 - \\ &6.4148\beta_1^2 + 3.1975\beta_1^3 \end{aligned}$$

式中: U_{p2} 、 β_2 分别为粒子碰撞后的反弹速度及其与壁面的夹角 (单位为 rad).

实际工况的粒子为 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 , 材料密度约为 $5\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$, 撞击喷嘴叶栅壁面后的反弹速度和角度按如下近似关系计算^[13]

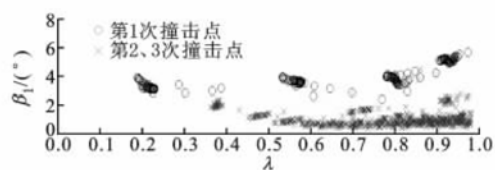
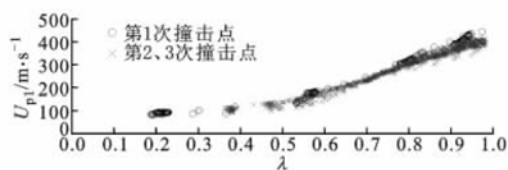
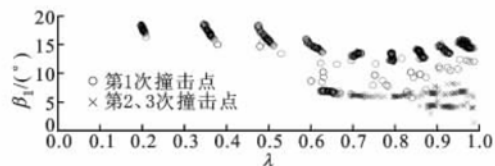
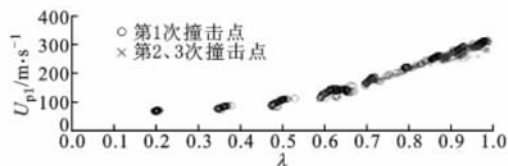
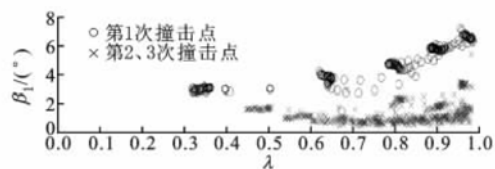
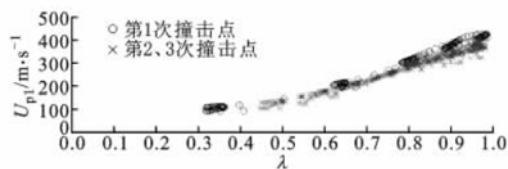
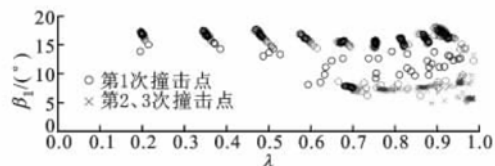
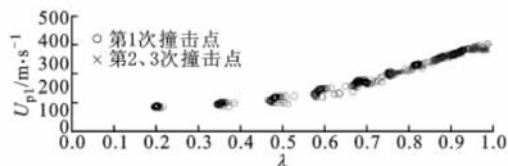
$$\begin{aligned} U_{\text{p2}}/U_{\text{pl}} &= 1.0 - 2.03\beta_1 + 3.32\beta_1^2 - \\ &2.24\beta_1^3 - 0.472\beta_1^4 \\ \beta_2/\beta_1 &= 1.0 + 0.409\beta_1 - 2.52\beta_1^2 + \\ &2.19\beta_1^3 - 0.531\beta_1^4 \end{aligned}$$

根据 2.1 节的算法对上述 2 种参数条件进行三维数值模拟, 获得了各自的粒子撞击壁面特性, 即 U_{pl} 、 β_1 和 λ 之间的关系. 为便于比较, 模化参数的计算结果已根据相似比例进行了还原. 图 4~图 7 分别为实际工况和试验工况下粒子直径为 10 和 $150\ \mu\text{m}$ 的计算结果.

表 2 计算的实际工况与模化试验工况参数

实际工况		试验工况		Stk
$d_p/\mu\text{m}$	$\rho_p/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$d_p/\mu\text{m}$	$\rho_p/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	
10	5 000	4.7	2 300	0.07
75	5 000	11.5	2 250	0.5
150	5 000	17	2 900	1.0

粒子与喷嘴壁面撞击是非常复杂和多样的, 有些粒子从叶栅进口到出口与壁面不发生碰撞, 但有些粒子撞击到壁面反弹后在汽流的作用下与壁面产生第 2 次甚至更多次的撞击. 结果表明, 与直接用实际蒸汽参数计算相比, 用模化参数计算并还原到实际工况后, 粒子的运动特性具有很高的相似性, 速度误差小于 5%, 角度误差小于 3° , 说明以 Ma 和 Stk 作为决定性相似准则进行高速气固两相流模化试验

(a) β_1 沿 λ 的变化曲线(b) U_{pl} 沿 λ 的变化曲线图4 粒子直径为 $10\ \mu\text{m}$ 时实际工况的计算结果(a) β_1 沿 λ 的变化曲线(b) U_{pl} 沿 λ 的变化曲线图5 粒子直径为 $150\ \mu\text{m}$ 时实际工况的计算结果(a) β_1 沿 λ 的变化曲线(b) U_{pl} 沿 λ 的变化曲线图6 粒子直径为 $10\ \mu\text{m}$ 时试验参数的计算结果(a) β_1 沿 λ 的变化曲线(b) U_{pl} 沿 λ 的变化曲线图7 粒子直径为 $150\ \mu\text{m}$ 时试验参数的计算结果

是可行的。

3 粒子反弹特性对模化试验的影响

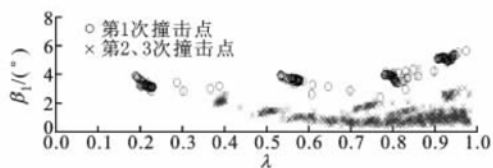
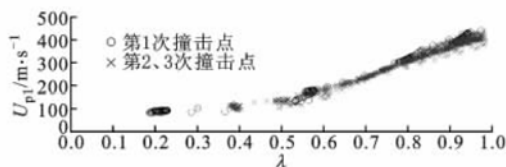
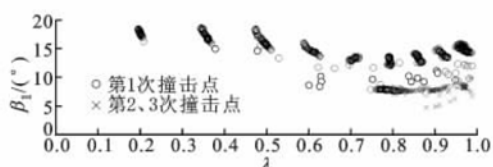
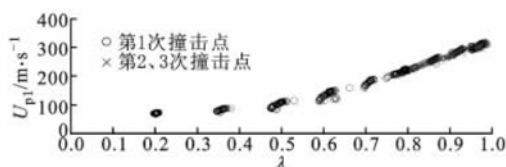
本文2.3节引用的反弹公式均为经验公式,有一定的局限性,且变化趋势相近,为了更清楚地体现粒子反弹特性对模化结果的影响,本节按表2中的实际工况参数计算了粒子与壁面碰撞后的完全反弹(极限情况),即 $\beta_2 = \beta_1$, $U_{p2} = U_{p1}$ 时粒子的运动特性,其结果如图8、图9所示。与图4、图5对比可看出,无论是大粒子还是小粒子,反弹特性对粒子速度的影响均小于3%,对角度影响基本可忽略。因此,忽略粒子反弹特性对研究超高参数汽轮机调节级喷嘴

嘴冲蚀影响不大。

4 结 论

(1)基于流动相似理论对超常参数条件下的汽固两相流动进行了分析,提出当汽流进入雷诺数的自模化区后,马赫数 Ma 和斯托克斯数 Stk 是两相流动的决定性相似准则。

(2)模化工况的两相流动滑移速度在试验后才能准确确定,因此试验前只能用三维数值计算来预测模化参数。在模化研究中,需要经过多种参数组合的试验,最终从中筛选出体现 Stk 在模型和原型对应截面相等的试验数据,这也正是超常参数两相流

(a) β_i 沿 λ 的变化曲线(b) U_{pi} 沿 λ 的变化曲线图8 直径为 $10\ \mu\text{m}$ 的粒子完全反弹时
实际工况的计算结果(a) β_i 沿 λ 的变化曲线(b) U_{pi} 沿 λ 的变化曲线图9 直径为 $150\ \mu\text{m}$ 的粒子完全反弹时
实际工况的计算结果

动模化研究的难点所在。

(3)用三维数值模拟预测模化前后的粒子速度偏差小于5%,角度偏差小于3°。从考虑粒子反弹特性和假定完全反弹2种模型的对比计算结果出发,论证了反弹特性对研究喷嘴冲蚀问题影响不大,偏差仅在3%以内,基本满足工程需要。

参考文献:

- [1] Mazur Z, Urquiza G, Compos R. Combating of the solid particle erosion in a steam turbines [C]// Proceedings of the 2002 International Joint Power Generation Conference, Scottsdale, USA: ASME, 2002:571-578.
- [2] Mann B S. Solid-particle erosion and protective layers

for steam turbine blading[J]. Wear, 1999, 224(1): 8-12.

- [3] 史进渊, 杨宇, 邓志成, 等. 超超临界汽轮机固体颗粒侵蚀的研究[J]. 动力工程, 2003, 23(4): 2487-2489, 2597.
- Shi Jinyuan, Yang Yu, Deng Zhicheng, et al. Research on solid particle erosion of ultra-supercritical steam turbines[J]. Power Engineering, 2003, 23(4): 2487-2489, 2597.
- [4] 景思睿, 张鸣远. 流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 91-96.
- [5] 李之光. 相似与模化理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 203-213.
- [6] 卡斯丘克 A Г, 福罗罗夫 B B. 汽轮机和燃气轮机[M]. 夏同棠, 刘英哲, 等译. 北京: 水利电力出版社, 1991: 62.
- [7] 李根深, 陈乃兴, 强国芳. 船用燃气轮机轴流式叶轮机械气动热力学原理设计与试验研究: 下册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 60-66.
- [8] Sumner W J, Vogan J H, Lindinger R J. Reducing solid particle erosion damage in large steam turbine [C]// Proceeding of American Power Conference, Chicago, USA: ASME, 1985: 196-212.
- [9] 岑可法, 樊建人. 工程气固多相流动的理论及计算[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1995: 368-370.
- [10] 赵建福, 李炜. 变速运动颗粒所受非恒定作用力分析[J]. 力学与实践, 1998, 20(3): 43-44.
- Zhao Jianfu, Li Wei. An analysis of characteristics of unsteady forces on accelerated particles[J]. Mechanics in Engineering, 1998, 20(3): 43-44.
- [11] 王顺森. 汽轮机调节级喷嘴通道内固体微粒运动特性研究[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2006.
- [12] 戴丽萍, 俞茂铮, 王贤钢, 等. 超临界汽轮机再热第一级叶片固粒冲蚀特性的数值分析[J]. 热能动力工程, 2004, 19(4): 347-350, 435-436.
- Dai Liping, Yu Maozheng, Wang Xiangang, et al. Prediction of solid particle erosion (SPE) characteristics of solid particles in the first reheat stage lades of the nozzle of a supercritical steam turbine governing stage and the measure against SPE[J]. Turbine Technology, 2002, 44(6): 329-332.
- [13] Beacher B, Tabakoff W, Hamed A. Improved particle trajectory calculations through turbomachinery affected by coal ash particles[J]. Journal of Engineering for Power, 1982, 104(1): 64-68.

(编辑 王焕雪)