

固体粒子在压缩机叶栅内的部分沉积模型研究^{*}

贾会霞, 席 光

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安, 710049)

摘 要: 针对轴流压缩机叶栅内固体微粒沉积的问题, 发展了新的粒子沉积模型 (部分沉积模型)。采用此模型和普遍采用的完全沉积模型进行了计算, 计算结果表明两种模型对叶栅前缘处的粒子沉积影响明显。采用部分沉积模型时, 叶片前缘处不会出现短时间内不合实际的大量沉积现象, 而表现为一种比较均匀的粒子沉积。

关键词: 轴流式压缩机; 粒子沉积⁺; 沉积模型⁺; 数值计算

中图分类号: V235.113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2003) 04-0319-04

Numerical studies in axial compressor cascades using partial deposition model

JIA Hui-xia, XI Guang

(Coll. of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049, China)

Abstract: To predict particle deposition in axial compressor cascades, a new particle deposition model was developed. Particle deposition was studied by "partial deposition model" and "entireness deposition model". The calculation results showed the two models have large effect on the deposition at the leading edge. Using part deposition model, the phenomenon of a great deal of particle deposition at the leading edge during very short period disappeared while particle deposition appeared relatively even deposition.

Key words: Axial flow compressor; Particle deposition⁺; Deposition model; Numerical calculation

1 引 言

空气中悬浮的粒子如沙子、灰尘等的进入是引起涡轮和压缩机性能降低的最主要因素。即使在透平的进口处装置高效的过滤系统, 也不能彻底消除固体粒子的进入。当透平内部叶面附近存在油的泄漏时, 固体粒子在叶面的沉积会严重扩大化。在多沙地区飞行的航空发动机性能受固体粒子影响很大。由于火山飞灰引起波音 747 发动机发生事故即属于此类^[1]。因此, 研究固体粒子在叶栅内的沉积规律, 对于预计透平的维修间隔, 指导发动机的维修具有实际意义。另外, 研究固体粒子在叶栅内的沉积有助于新型防沉积叶片的研究。但是, 目前有关预测固体粒子沉积的计算软件都还存在很大局限性, 例如本文所采用的 FLUENT 软件在计算固体粒子运动时, 要么假定固体粒子一旦与叶栅壁面碰撞即全部沉积, 无任何反

弹; 要么假定固体粒子全部反弹, 无任何沉积, 这两种假设与实际情况都有很大出入。因此, 有必要研究固体粒子在壁面处的部分沉积模型以提高预测精度。

2 固体粒子沉积粘附的计算模型

Parker 和 Lee 采用在涡轮叶栅壁面上粘贴粘附带的办法来测量粒子在涡轮叶栅上的沉积规律^[2]。此后, Menguturk 和 Sverdurp 发展了考虑布朗扩散和湍流扩散的沉积理论, 并用它进行了一台气轮机通道内粒子沉积的数值计算^[3]。Menguturk 和 Gunes 等考虑边界层对粒子沉积的影响, 计算了燃气轮机内粒子的沉积^[4]。随后, Ahluwalia 提出了惯性沉积模型, 他考虑热泳力的影响分析了燃气轮机叶片表面上固体微粒的沉积特性^[5]。

在粒子的沉积计算中, 一般都假定粒子与壁面接触后全部粘附于壁面, 这种假定显然与实际情况有很

^{*} 收稿日期: 2002-05-26; 修订日期: 2002-11-06。

作者简介: 贾会霞 (1977—), 女, 博士生, 研究领域为叶轮机械气动计算。

大出入。Dunn 和 Brach(1992)^[6] 引入了粒子临界速度的概念,认为粒子在壁面处的粘附依赖于粒子在壁面处的各个参数。本文以该思想为基础,对于与壁面发生碰撞的粒子引入一定的粘附条件,当粒子满足条件时才在壁面沉积粘附。

本文气相场的计算采用质量、动量和能量方程组成的封闭方程组。湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,差分格式为二阶迎风差分。对于固体粒子的计算采用拉格朗日方法。

在拉格朗日法中,固体粒子的运动方程为

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = F_D(\vec{v} - \vec{v}_p) + \vec{F}_{add} \quad (1)$$

此处 $F_D(\vec{v} - \vec{v}_p)$ 为单位质量粒子所受的阻力, $\vec{F}_{add}$ 为作用于粒子上的附加力,例如湍流扩散作用力等,在本文中包括湍流扩散力和 Saffman 升力。

Tabakoff 等人在研究粒子与壁面碰撞的反弹关系式(也即反弹恢复系数)方面做了大量的工作,给出了不同粒子材料和不同固体壁面材料碰撞的反弹恢复系数。文中采用 Tabakoff 实验得到的两组粒子反弹关系式(飞灰粒子与铝靶材,飞灰粒子与钛靶材^[7])进行了计算。

式(2)~(5)分别给出了飞灰粒子和铝靶材、飞灰粒子与钛靶材的碰撞反弹恢复关系式

$$e_T = V_{T2}/V_{T1} = 1.07915 - 2.64204\beta_1 + 8.38479\beta_1^2 - 10.80932\beta_1^3 + 4.62071\beta_1^4 \quad (2)$$

$$e_N = V_{N2}/V_{N1} = 1.03047 - 1.08969\beta_1 - 1.40079\beta_1^2 + 3.65638\beta_1^3 - 1.75401\beta_1^4 \quad (3)$$

$$e_T = V_{T2}/V_{T1} = 1.01059 + 0.40772\beta_1 - 4.66001\beta_1^2 + 6.60803\beta_1^3 - 2.38436\beta_1^4 \quad (4)$$

$$e_N = V_{N2}/V_{N1} = 0.9709 + 1.52133\beta_1 - 8.56369\beta_1^2 + 10.5939\beta_1^3 - 3.93154\beta_1^4 \quad (5)$$

其中 β_1 为粒子的入射速度方向与粒子撞击处壁面的切向间的夹角,下标 1,2 分别表示反弹前后, e_T , e_N 分别为粒子碰撞前后的切向速度恢复系数和法向速度恢复系数。

3 涡轮叶栅内粒子沉积的数值计算

本文首先计算了一有实验数据的涡轮叶栅^[2]内的粒子沉积计算。计算时湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,近壁处理采用两层区域模型法。计算中假设若粒子与壁面碰撞,粒子就粘附在壁面上。该涡轮叶栅的几何形状如图 1 所示。

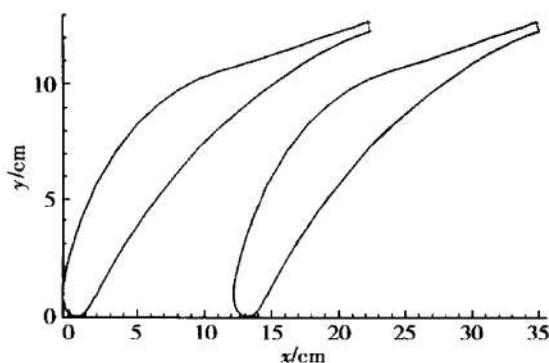


Fig. 1 Turbine cascade geometry

实验在一低速风洞中进行,叶栅入口速度为 11m/s,湍流度 2.2%。以叶片弦长为特征长度,出口速度为特征速度的叶片雷诺数为 10^6 。该叶栅叶高为 0.167m。1,000 个球形同等直径大小的沥青铀矿粒子以流体速度从进口处均匀进入。

图 2 为数值计算结果与实验数据的比较(直方图为实验数据,曲线为数值计算结果)。横坐标为从叶片前缘点起沿叶面的距离与叶片弦长的比值;纵坐标为粒子沉积百分比,指壁面上的粒子沉积量占通过单位叶栅栅距、单位高度截面的粒子百分比。其中横坐标正方向为叶片背弧面粒子的沉积结果,负方向为叶片腹弧面粒子的沉积结果。

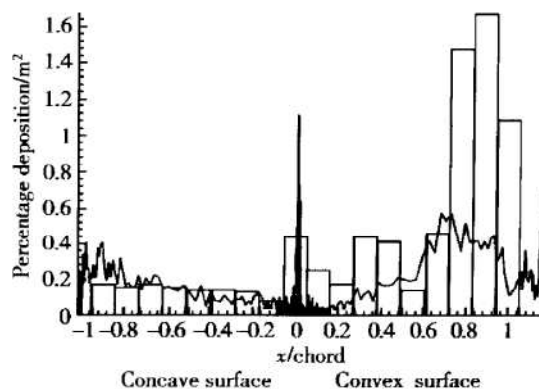


Fig. 2 Comparison between the numerical result and experimental data

微粒在叶面当地的沉积百分比由 h_D/Q 定义。其中, Q 为通过单位栅距单位高度的截面的空气体积流率; h_D 为质量传输系数, h_D 由单位面积单位时间的沉积质量与入口粒子浓度的比值计算。

由图 2 的计算结果可看出对于粒子在涡轮叶栅内的沉积,在前缘处和在背弧面的后部与实验值相差较大,但计算结果已较好地将实验数据中背弧面的中部粒子沉积百分比发生大幅度变化的趋势表现出来,

此外在叶栅的腹弧面沉积的计算结果和实验数据也符合较好。

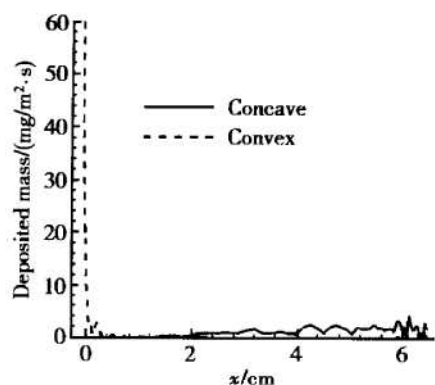
4 数值计算及结果分析

本文中所用的轴流压缩机翼型的几何形状可见文献[8]。该叶片弦长 69.95mm, 栅距 30.435mm。气流的入口总压为 128.05MPa, 入口总温为 312.46K; 出口静压 98.57MPa。叶栅进口安装角为 46.3° 。为了研究不同气流进口角对粒子沉积的影响, 本文计算了三个气流进口角, 分别为 42° , 46° 和 53° 。

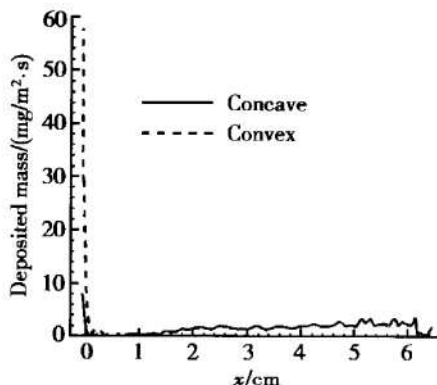
本文采用非耦合隐式稳态求解气流场, 湍流方程采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 近壁处理采用两层区域模型法。固相采用拉格朗日方法进行计算。粒子在壁面处的沉积采用两种不同的粒子沉积粘附条件进行了计算。一种仍为粒子碰撞后全部粘附, 另一种粘附条件通过用户定义子程序施加, 粒子在壁面处的反弹遵从 Tabakoff 的粒子反弹关系式, 粒子在满足一定的条件时粘附。图 3~5 中的 (a) 图给出了粒子与壁面碰撞即全部粘附的计算结果。粒子入口流量为 3mg/s。

图中纵坐标表示单位面积, 单位时间内叶面上粒子的沉积质量。

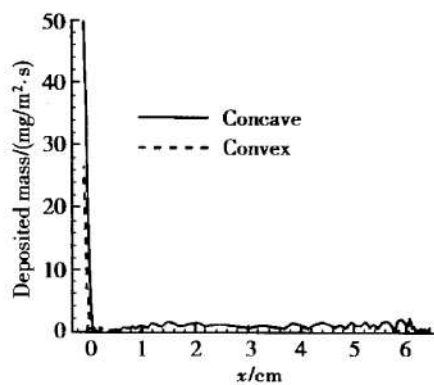
从图 3~5 中的 (a) 图中可以看到, 采用前一种粘附条件时, 粒子主要沉积于叶栅的前缘处。 42° 气流进口角时, 粒子沉积主要出现在叶片背弧面的前缘处; 气流角为 46° 时, 叶片腹弧面前缘处出现沉积, 但背弧面前缘处的沉积仍大于腹弧面前缘处的粒子沉积; 但当气流角增大到 53° 时, 粒子在腹弧面前缘处的沉积已大于背弧面前缘处的沉积。总之, 不论在哪个气流角下, 此时, 叶片前缘处固体微粒的沉积都非常严重, 沉积量大约为其它部分的几十倍。由于该流场中粒子运动速度很大, 且假设叶面无油类等粘性物质的存在, 则粒子在与叶面碰撞后可能有一部分会返回流场继续运动。因此, 文中引入了另一种粘附条件 (粒子的部分粘附), 以更好地预测粒子在该叶栅内的沉积情况。粒子在壁面处的反弹关系式首先选用了飞灰粒子和铝靶材的反弹关系式^[7]。图 3~5 中的 (b) 图给出了三个气流角采用 UDF (用户定义函数) 后粒子沉积的计算情况。



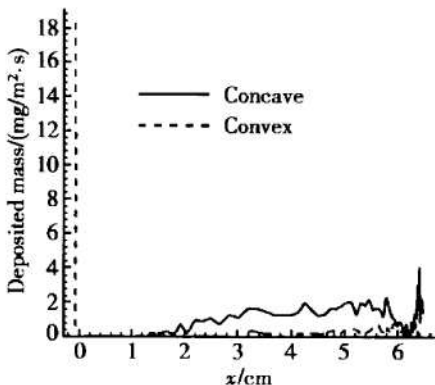
(a) Entireness deposition model



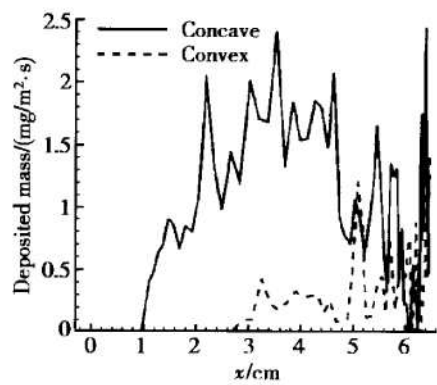
(a) Entireness deposition model



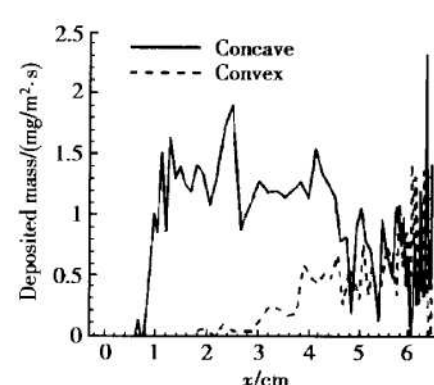
(a) Entireness deposition model



(b) Partial deposition model



(b) Partial deposition model



(b) Partial deposition model

Fig. 3 Comparison of deposition mass between two deposition models for inlet angle of 42°

Fig. 4 Comparison of deposition mass between two deposition models for inlet angle of 46°

Fig. 5 Comparison of deposition mass between two deposition models for inlet angle of 53°

由图 3~5 中的(b)图可看出采用部分粘附模型后,沉积多发生在叶片的腹弧面的中后部,当气流入角变化时,粒子在腹弧面的沉积略有变化。在三个气流进口角,腹弧面叶片前缘处都无沉积,入口角从 42° 变化到 53° 时,腹弧面的粒子起始沉积位置逐渐前移。除进气角为 42° 时叶片背面前缘处外,粒子在背弧面的沉积都非常轻微。 42° 背弧面前缘处沉积严重。

从图 3~5 中的(a),(b)图对比可以看出,(a)图中沉积主要发生在叶片前缘,而(b)图中除 42° 进气角外,前缘处都无沉积,由此可知,本文所引入的粘附条件对粒子在叶栅前缘处的沉积预测情况影响很大。

此外,文中还研究了不同靶材对飞灰粒子沉积的影响。为了节省篇幅,文中只给出了 53° 进气角时飞灰和钛靶材碰撞时的沉积情况。图 6 给出了 53° 气流进口角时采用飞灰和钛靶材的反弹关系式计算得到的粒子沉积结果。由图 5(b) 和图 6 的对比中可看到采用不同反弹恢复关系式的计算结果稍有差别。靶材为钛时腹弧面位置为 0.04m 时沉积要低于靶材为铝时的粒子沉积。靶材为钛时在腹弧面的 0.01m 到 0.04m 处粒子沉积较均匀,靶材为铝时腹弧面从 0.01m 到 0.05m 处粒子沉积都比较均匀。这说明粒子的反弹恢复系数对粒子沉积的影响是比较明显的。

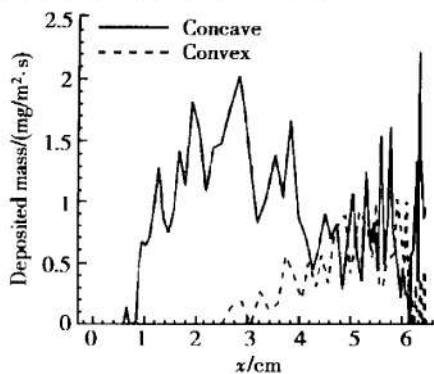


Fig. 6 Deposition mass with partial deposition model using the reflect coefficient of fly-ash and titanium at inlet angle of 53°

5 结 论

(1) 计算了涡轮叶栅内粒子的沉积情况。计算结果与实验数据在沉积的变化趋势上符合较好,但在叶栅的前缘和背弧面的后部沉积计算结果和实验数据有一定差别。

(2) 采用两种粘附条件计算了粒子在轴流压缩机

叶栅内的沉积。当粒子 100% 粘附时,在三个气流进气角条件下,粒子在叶栅的前缘处沉积都非常严重,而在其它位置粒子的沉积都很轻微。叶栅前缘处粒子的沉积量为叶栅叶面其它位置的几十倍。

(3) 通过用户程序在叶栅的壁面处对粒子沉积限制一定的粘附条件。并将该计算结果与前者沉积计算结果进行了对比,发现引入一定的粘附条件后对粒子在叶栅前缘处的沉积影响非常显著。粒子在叶栅腹弧面中后部均匀沉积,其它位置则沉积很少。

(4) 不同的粒子反弹恢复关系式对粒子在叶栅壁面处的沉积也有影响。

致 谢: 感谢日立公司动力与工业系统研究与发展实验室对本研究项目的资助。

参考文献:

- [1] Lakshminaraimha A N, Boyce M P, Meher-Homji C B. Modeling and analysis of gas turbine performance deterioration [J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1994, 116: 46~ 52.
- [2] Parker G J, Lee P. Studies of the deposition of submicron particles on turbine blades [C]. *Ins. Mech. Eng. Proc.* Vol. 186 38/72, 1972.
- [3] 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: 69~ 76.
- [4] Menguturk M, Gunes D. Blade boundary layer effect on turbine erosion and deposition [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1983, 105: 270~ 276.
- [5] Ahluwalia R K. Particle and vapor deposition in coal-fueled gas turbine [J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1987, 109/325.
- [6] Brach R, Dunn P F. A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1992, 16(1): 51~ 64.
- [7] Tabakoff W, Malak M F, Hamed A. Laser measurements of solid particle rebound parameters impacting on 2024 aluminum and 6Al-4V titanium alloys [J]. *AIAA Journal*, 1987, 25(5): 721~ 726.
- [8] 席 光, 贾会霞. 轴流压缩机叶栅内固体微粒沉积的数值研究 [A]. 中国工程热物理学会第十届年会论文集 [C], 2001, 017010.

(编辑: 王居信)