



中国工程热物理学会

热机气动热力学学术会议

论文集

二〇〇四

西安

中国工程热物理学会编



热机气动热力学学术会议论文目录

一. 模拟方法的研究和应用

042003 固体颗粒对超临界汽轮机喷嘴叶栅侵蚀的数值研究.....	黄洪雁 华树波 黄 强 韩万金 王仲奇(1)
042004 锥柱航行体绕流数值计算研究.....	权晓波 杜建一 刘芙群 朱学昌 徐建中(7)
042005 离心压气机顶部进口条件对叶轮内部流动的影响.....	戴 冀 耿少鹃 黄伟光(11)
042007 使用 RSM 模型的旋风除尘器内三维湍流流场的数值模拟.....	张 雅 刘淑艳 王保国(17)
042008 KIVA 程序网格生成算法的改进及雷诺应力模型计算.....	王海刚 刘 石(24)
042010 汽轮机 1200 mm 长叶片级内流动 CFD 分析.....	戴 韧 姚 征 康 顺 祁明旭(30)
042011 三维并行 CFD 程序的开发与校核.....	李雪松 徐建中(35)
042012 1+1/2 对转涡轮三维流场数值分析.....	赵庆军 王会社 赵晓路 徐建中(41)
042013 1+1/2 对转涡轮中激波/叶排相互作用的数值研究.....	王会社 赵庆军 赵晓路 徐建中(49)
042014 空冷透平静叶气膜冷却数值研究.....	安柏涛 刘建军 蒋洪德(54)
042016 微燃机稳压箱的计算分析.....	祁志国 杜建一 汤 华 赵晓路 徐建中(61)
042020 空冷汽轮机低压缸马刀叶片性能三维数值分析.....	阳 虹 邓向阳 张宏武 杨建道 刘小军(67)
042022 凝结流中自激振荡想象的一维数值研究.....	李 亮 李国君 丰镇平(73)
042024 振荡扰流对分离流动叶栅气动性能影响的数值研究.....	王嘉炜 王正明(79)
042026 可压缩性对两方程紊流模型的影响.....	马晓永 李国君 李 亮 丰镇平(86)
042028 前缘弯掠斜流转子叶顶间隙泄漏流动的数值分析.....	游 斌 谢军龙 吴克启(93)
042032 三维对流反应方程的高精度多重网格方法.....	田瑞雪 吴文权 詹 咏 葛永斌(101)
042034 关于自由射流计算的两点考虑.....	娄德仓 吕盘明(105)
042049 涡轮内外涵联立数值模拟.....	杨 琳 刘火星 邹正平 李 维(113)
042050 细长体大功角流动结构的数值模拟.....	王 刚 梁新刚(119)
042051 静止转弯通道内的湍流流动与换热.....	李增耀 陶文铨(123)
042052 计算域选取对 CFD 模拟结果的影响.....	康 顺(128)
042054 30 万千瓦空冷汽轮机组低压排气缸数值模拟.....	杨 科 李宇峰 康 顺(134)
042065 湿蒸汽两相流动问题的耦合求解.....	巫志华 李 亮 丰镇平(139)
042068 4 气门直喷式柴油机燃烧研究.....	郭晓平 王占杰 许 锋(145)

042069	定常吸气改善叶型气动性能的研究·····	唐 进 李宇红(151)
042070	一个高压比离心叶轮的 CFD 分析和结果确认—第一部分：结果确认·····	康 顺 刘 强 祁明旭(157)
042071	一个高压比离心叶轮的 CFD 分析和结果确认—第二部分：近设计点结果分析·····	康 顺 刘 强 祁明旭(165)
042074	多级轴流压气机全工况特性计算·····	苏欣荣 袁 新(170)
042076	汽轮机末级叶片平衡态湿蒸汽流动数值模拟·····	林智荣 袁 新(175)
042077	自发凝结流动数值模拟方法及其在 Laval 喷管中的应用·····	林智荣 袁 新(180)
042085	新型湍流模型特性的研究·····	雷俊勇 祁海鹰 由长福 徐旭常(184)
042090	汽油转子发动机性能数值模拟研究·····	李立君 尹泽勇 乔渭阳 刘志华 胡燕华(191)
042091	绕凸包主动流动控制的初步数值研究·····	季路成 林 峰 Marco P. Schoen(199)

二. 设计及优化

042009	多联产系统燃料压力能回收透平设计·····	张冬阳(212)
042015	带大小叶片楔形扩压器设计及流场分析·····	汤 华 杜建一 祁志国 赵晓路 徐建中(217)
042017	对转涡轮在火箭涡轮泵上的应用·····	唐 菲 赵晓路 徐建中(222)
042018	高比转速离心压气机叶轮的设计及其三维流场分析·····	杜建一 祁志国 赵晓路 徐建中(229)
042023	动静叶栅优化改型及其性能分析·····	王正明 王嘉炜(234)
042030	透平级中自发凝结及叶栅中非均质凝结流动的初步研究·····	陈红梅 李 亮 丰镇平 李国君(239)
042031	采用混合优化方法的压气机叶片弯掠匹配优化·····	赵桂杰 陈 浮 宋彦萍 王仲奇(244)
042035	一个叶片几何形状设计的数学方法—湍流边界的控制问题·····	李开泰 高丽敏 苏 剑(250)
042036	离心压气机叶尖间隙泄漏流动数值研究·····	彭 森 杨 策 马朝臣(257)
042040	小流量工况下汽轮机低压缸末两级三维粘性流场数值分析·····	邓向阳 阳 虹 张宏武 黄伟光 杨建道 刘小军(263)
042041	叶型中弧线的最大弯度位置对跨音速压气机叶片性能影响的研究·····	陈乃兴 张宏武 徐燕骥 黄伟光(269)
042044	航空发动机内外涵道三维粘性流场的数值模拟·····	赵永辉 张宏武 聂超群(279)
042047	低速轴流压气机中工况变化对动叶顶部泄漏流波动频率的影响·····	邓向阳 张宏武 黄伟光(284)
042048	低雷诺数条件下涡轮气动设计·····	杨 琳 刘火星 邹正平 李 维(291)
042059	微尺度变化下吸气式扩压叶栅性能研究·····	宋彦萍 陈 浮 赵桂杰 陈开莹 王仲奇(296)

042060	BLS 对压气机叶栅稠度特性影响之一: 吸气量及位置变化	陈 浮 宋彦萍 赵桂杰 刘 军 王仲奇	(300)
042061	BLS 对压气机叶栅稠度特性影响之二: 稠度变化	宋彦萍 陈 浮 赵桂杰 刘 军 王仲奇	(305)
042064	自适应差分进化算法及其在三维叶栅气动优化设计中的应用	宋立明 李 军 丰镇平	(310)
042066	壁面吸气抑制分离减少流动损失的研究	王松涛 潜纪儒 冯国泰 王仲奇	(318)
042067	两种冲角下压气机叶栅内涡系结构的拓扑分析	张华良 王松涛 王仲奇	(323)
042072	Kriging 方法与响应面方法在气动优化设计中的应用研究	王晓锋 席 光 王尚锦	(330)
042073	径流及斜流压气机、涡轮任意曲面叶型长短叶片的样条造型	王 琦 单 鹏	(337)
042075	基于 NURBS 三维造型的粘性气动最优化设计技术	陈 波 袁 新	(345)
042080	叶轮机械全三维粘性气动优化设计系统	高学林 袁 新	(351)
042081	低速条件下不同折转角的扩压叶栅采用弯叶片对流场影响的分析	张永军 陈 浮 冯国泰 苏杰先	(356)
042084	某离心叶轮改型气动设计	陈 江 季路成	(361)
042086	透平静叶安装节距误差对级性能影响的数值研究	陈 江 季路成 蔡 虎	(370)
042087	WP6 涡轮部件设计状态及实验状态的数值模拟	周 勇 赵晓路 徐建中	(380)
042088	前置导叶对后加载叶栅气动性能的影响	周 逊 韩万金 王仲奇	(388)
042092	轴流压气机设计中“掠”的另类认识—I: 回顾与另类认识	季路成 陈 江 林 峰	(398)
042093	轴流压气机设计中“掠”的另类认识—II: 关于某转子“掠”的分析	季路成 陈 江 林 峰	(411)

三. 实验研究

042025	某型低压涡轮导向器叶栅改型实验研究	陈绍文 陈 浮 宋彦萍 徐文远 王仲奇	(418)
042027	最优工况下尾水管进口流动 PIV 测试研究	王 军 付之跃 温国珍 吴克启	(423)
042033	污染扩散瞬时浓度场的测量研究	卢 曦 吴文权	(429)
042037	基于相关积分方法的压气机气动不稳定监测	吴 云 张 朴 李应红 刘建勋 宋慧敏	(434)
042038	低速轴流压气机进口总压畸变与失速关联的试验研究	张靖煊 童志庭 聂超群	(440)

042039 轴流压气机叶顶梯状间隙内部流动的数值模拟与实验.....	卢新根 王如根 楚武利(448)
042043 周向进口畸变对压气机失速过程的影响.....	李美林 林 峰 陈静宜 童志庭 聂超群(453)
042046 低速轴流压气机单转子旋转失速三维数值模拟和实验的比较.....	蒋康涛 张宏武 黄伟光 陈静宜(458)
042053 小展弦比后加载叶栅气动特性实验及数值研究.....	祁明旭 丰镇平(465)
042055 四级轴流涡轮变工况数值分析.....	祁明旭 康 顺(471)
042058 驻波型热声发动机中谐振管与谐振腔的实验研究与数值模拟.....	张 泳 罗二仓 戴 巍(477)
042078 振荡射流提高风力机叶型升力的 PIV 流场显示实验.....	陈 默 刘 红 袁 新(482)

四. 非定常流动和气动声学及其它

042006 非结构网格下非定常流场双时间步长的加权 ENO-强紧致杂交高分辨率格式.....	王保国 刘淑艳 张 雅 纪秀玲 靳艳梅(487)
042019 太阳能热气流发电技术的热力分析与计算.....	张楚华 席 光(494)
042021 里克型燃烧室内热声耦合振荡特性研究.....	李祥晟 丰镇平 蔡睿贤(502)
042029 二维非定常对流扩散方程的高精度多重网格方法.....	葛永斌 田振夫 詹 咏 吴文权(507)
042042 不同进口畸变下低速压气机近失速状态的非定常特征.....	童志庭 张靖煊 李美林 聂超群(515)
042045 低速轴流压气机单转子和拉开轴向间隙单级旋转失速的二维数值模拟.....	蒋康涛 张宏武 黄伟光 陈静宜(521)
042056 二维机翼非定常气动反命题的欧拉解法.....	杨爱玲 姚 征 刘高联(528)
042057 气冷涡轮级叶栅非定常流场数值模拟.....	颜培刚 王松涛 冯国泰 王仲奇(533)
042062 时间倾斜算子在离心压缩机动/静相干非定常模拟中的应用.....	周 莉 席 光(542)
042063 空腔非局域反应声衬传播特性研究.....	刘 宇 杜 林 孙晓峰(548)
042082 尾迹干扰的逆反射效应对低速压气机静叶 Clocking 效应影响的二维数值模拟.....	杨海涛 黄洪雁 冯国泰 苏杰先 王仲奇(556)
042083 低速压气机中静叶 Clocking 效应的二维和三维数值模拟与实验结果的验证.....	杨海涛 黄洪雁 冯国泰 苏杰先 王仲奇(563)
042089 热声现象的一种非线性模型的研究.....	徐栅姝 景晓东 孙晓峰(571)
042094 相位延迟法在双排涡轮三维非定常流动数值模拟中的应用.....	刘锡阳 于海力 赵晓路 徐建中(580)
042095 亚音悬停主旋翼的噪声预测研究.....	王同庆 李琪娜 彭 锋(587)
042096 亚音悬停主旋翼的声隐身分析.....	王同庆 彭 锋 李琪娜(592)

固体颗粒对超临界汽轮机喷嘴叶栅侵蚀 的数值研究

黄洪雁 华树波 黄强 韩万金 王仲奇

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 458 信箱, 哈尔滨 150001)

(联系电话: 0451-6413261, E-Mail: huang_hy04@hit.edu.cn)

摘要:

采用考虑气固两相流动的数值模拟方法, 对超临界汽轮机的喷嘴叶栅进行了数值模拟, 结果表明固体微粒对叶栅壁面的侵蚀作用主要出现在流道中后部的压力面上, 在这一位置磨蚀沿叶展方向的分布是不均匀的, 在中部偏上的地方磨蚀最为严重, 中部偏下的地方稍微轻一些。在叶栅吸力面上出现的磨损, 是由压力面上反射来的大直径微粒造成的, 小直径微粒不对压力面形成磨损。

关键词:

超临界汽轮机, 气固两相流动, 磨蚀。

1 引言

汽轮机投产运行较长时间后, 往往从锅炉炉管及主蒸汽管等内壁上脱落一些细微锈垢的固体颗粒, 在主蒸汽气流的吹动下, 脱离壁面, 以一定尺度的微小颗粒形式随蒸汽流向叶栅流道。伴随着这些含有微小固体颗粒的蒸汽的流入, 在调节阀、透平的动、静叶片处产生了滑动磨损、固体粒子腐蚀等现象。在固体颗粒的长期磨蚀作用下, 可能使叶片的尾缘部分的叶型完全破坏, 成为损害透平机械可靠性原因之一。同时, 固体颗粒对叶片的磨损, 使得叶片的光洁度、叶型型线都偏离设计值, 导致流动损失增大, 叶栅气动效率降低。如何减轻或避免固体粒子对高负荷汽轮机中高温、高压部位的腐蚀作用, 在国内外透平机械厂和设计所的同行中引起了越来越密切的关注。

在超临界参数的汽轮机中，壁面污垢脱落形成的固体颗粒对叶栅的磨蚀作用将会更强。超超临界机组选用直流锅炉，直流锅炉相对于气包炉，给水品质要求比较高。当凝结水处理设备发生故障时，杂质和污物进入锅炉。直流锅炉没有气包，不能进行定期排污，给水中的杂质进入汽轮机，对汽轮机的高温叶片等部件造成固体颗粒磨蚀。超超临界机组温度高，锅炉高温受热管面容易产生氧化垢(Fe_2O_3 , Fe_3O_4)。英国中央电力局的实验结果表明：当蒸汽温度高于 600°C 时，锅炉受热面管子高温腐蚀和汽侧氧化问题十分显著；奥氏体管材最大腐蚀（汽侧腐蚀）出现在 640°C – 700°C 。超超临界锅炉的过热器、再热器、主蒸汽和再热蒸汽管道内表面剥离的微型固体颗粒，会随着蒸汽进入汽轮机。固体颗粒以蒸汽的速度通过汽轮机的通流部分时，会造成喷嘴和动叶损伤。超超临界机组高压第一级喷嘴、中压第一级喷嘴的固体颗粒磨蚀现象比较严重。因此，本研究中采用气固两相流动的数值模拟方法，模拟用于超临界、超超临界机组的喷嘴叶栅，探讨固体颗粒对这类叶栅的侵蚀问题。

2 计算模型

计算中采用商用计算流体力学软件 CFX-TASCflow，对叶栅流场进行了详细的全三维数值模拟，重点讨论了固体颗粒对叶栅壁面的磨蚀问题。采用的计算网格如图 1，网格数为约 130,000。

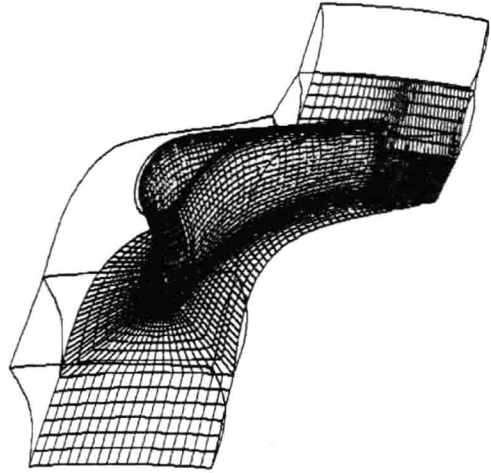


图 1 计算网格

3 数值模拟结果讨论

3.1 叶栅中固体颗粒的流动特点

在给定的几何参数，与气动参数条件下，由壁面脱落或其他原因一些固体颗粒进入叶栅流道，假设这些颗粒的直径分布如表一：

表一 气体颗粒直径、重量分布

直径 (μm)	10	55	110	200
重量比率 (%)	15	35	35	15

图 2 是通过气固两相流动计算得到的固体颗粒在叶栅流道内的流动轨迹。半径最小的微粒 ($10\mu\text{m}$)，流动惯性较小，在外力作用下，易于发生方向变化，这类微粒在叶栅内气流的带动和相应压力梯度的作用下，方向改变较快，基本与气流方向一致(见图 2(a)和(b))。半径最大的微粒 ($200\mu\text{m}$)，质量相对较大，流动惯性大，这类微粒在与叶栅的压力面碰撞之前，轨迹都保持比较好的近似于直线的形状。对于其他两种直径的

微粒 ($55\text{ }\mu\text{m}$, $110\text{ }\mu\text{m}$), 轨迹正好位于上述两类微粒之间, 微粒 ($55\text{ }\mu\text{m}$, $110\text{ }\mu\text{m}$) 轨迹的曲率因半径不同而有少许变化。从图中可以看出, 大部分微粒与叶栅的压力面发生碰撞, 在叶栅流道的中后部碰撞尤为严重, 且半径较大的微粒, 与压力面的撞击角度在 $30\text{--}70$ 度之间, 正好处于对壁面磨蚀较为严重的角度范围内。

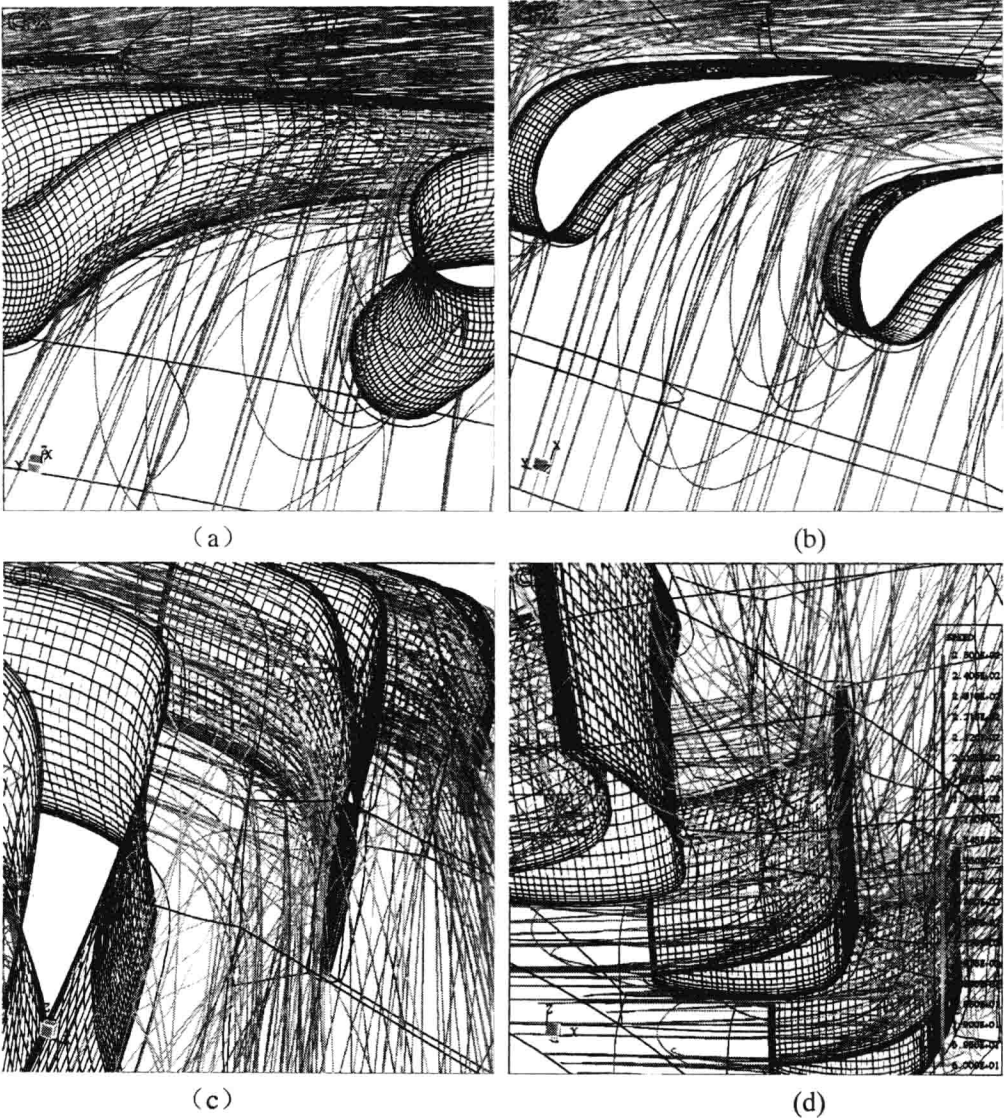


图 2 固体颗粒在叶栅内的运动轨迹

在叶栅后部, 质量较轻的固体颗粒在气流和相应的横向压力梯度的作用下, 大部分直接折转、加速后离开叶栅流道 (2(c)和(d)), 没有与叶栅的压力面发生碰撞, 少部分离压力面比较近的颗粒可能与叶栅壁面碰撞。在计算中, 每种颗粒跟踪的粒子数为 500 颗, 图 2 的显示中每种粒子显示了 20 颗, 因此, 微粒流动中很多信息没有完全反映出来。质量较大的微粒, 穿过压力面上的气体附面层, 撞击到叶栅压力面上。在计算中假设碰撞是弹性碰撞, 因此微粒的入射角度和反射角度相同。在叶栅的中后部, 一方

面气流的降压加速，气流速度提高，另一方面，反射后的微粒速度方向与气流的流动方向差异较大，使得气流对反射后的微粒的作用力增强，因此在叶栅流道的中后部，这部分微粒尽管本身流动惯性较大，也很难保持被压力面反射后的出射方向，与它们在叶栅前部时的轨迹相反，其轨迹不再是近似直线了，而是具有一定曲率的弧线(见图 2(c)，(d))。

在吸力侧的大部分范围内，不像压力面，发生的是微粒的直接撞击（一次撞击），图 2 中基本没有观察到微粒与吸力面直接撞击的现象，而是有少部分粒子经过压力面反射后撞击到吸力面后部的地方（二次撞击）。在叶栅圆柱型前缘的吸力边，可能发生小范围的一次撞击。如果沿着入口来流方向作吸力面的切线，则在切点以后到发生二次撞击地方的吸力面上的大部分范围内，由于固体颗粒的流动惯性，固体颗粒不可能直接撞击到这部分壁面。在发生二次撞击的吸力面区域，该区域已经靠近叶栅的斜切部分，亚声速情况下这一区域的流体基本上是沿壁面的法线方向流动的，超声速情况流体还有远离壁面法线方向的趋势，因此这一区域不可能再发生一次碰撞了。不过，在叶栅中后部还应该注意，在压力面 50%-70%弦长处(见图 2(b)，(c)，(d))，部分半径比较大的微粒经过压力面反射后，撞击到相邻叶栅的吸力面，对壁面的撞击角度有的也在 20-45 度左右。

3.2 固体颗粒对叶栅壁面的磨蚀率

影响磨蚀效果的原因是多种多样的。从冲击物来说，固体微粒的形状、硬度、冲击角度、冲击速度、密度对冲击效果有影响。从被冲击物来说，它的材料显微结构、硬度、塑性、加工硬化性、残留应力、表面状况等对冲击效果也有影响。很难有一个综合考虑这些因素的磨蚀率计算公式。在磨蚀率计算中，采用以下公式：

$$\varepsilon = fV^\alpha \quad (2)$$

其中 ε 表磨蚀率， V 表示微粒的撞击速度， α 常数，对塑性材料，取值在 2-3.4 之间，本研究中取 2。 f 为系数，它与微粒的撞击角度有关，由如下关系确定：

$$f = \begin{cases} \frac{1}{3} \sin^2 \theta & 0 < \theta < 0.4\pi \\ \sin 2\theta - 3 \cos^2 \theta & 0.4\pi < \theta \end{cases} \quad (3)$$

式中 θ 为固体颗粒与壁面切向的夹角。

对于压力面，在叶栅 50%轴向弦长之前，固体微粒对叶栅的磨蚀效果比较弱，50%弦长之后到出口磨蚀作用逐渐增加，在流道的后部最为严重。从图 2 (a) 中还可以看出，叶栅压力面后部壁面的磨蚀沿叶展方向的分布也是不均匀的，在中部偏上的地方磨蚀最为严重，中部偏下的地方稍微轻一些，呈斜坡状。在叶栅的圆柱型前缘附近，固体微粒穿过壁面附面层撞击到叶片上，微粒与壁面的夹角较大，几乎是沿着壁面的法线方

向来的（图 2（a），（b）），但是此时气流没有进入叶栅流道，蒸汽气体的速度比较低，其携带固体颗粒的速度也不会太大。在柱型前缘后到 50%弦长处，叶栅流道内的气体开始加速，但是在叶栅压力面附近，气流的加速是不严重的（无论是从不同的轴向位置还是不同的周向位置比较），这个位置的固体颗粒的速度相对于中后部的固体颗粒的速度而言，是比较低的。再者，从图 2 的（a），（b）可以看出，撞击到这部分壁面的固体颗粒，一方面，大多角度较小，另一方面仅局限于吸力面附近的少部分微粒，流道中部的微粒根本没有影响，这个区域内的磨蚀效果必然相对较小。因此，压力面上在柱型前缘后到 50%弦长处由（2）式计算得到的磨蚀率也是比较低的。在 50%弦长以后的压力面上，固体微粒的磨蚀效果明显增大，在出口中上部的压力面上较大区域范围内出现高磨损区域。从图 2 的（a），（b）可以看出，撞击到叶栅后部壁面的固体颗粒，入射角度基本都在 50 度左右，是磨蚀系数 f 比较大的角度范围，同时更重要的是，叶栅的中后部区域蒸汽气流降压加速，主气流速度比较大，其携带的固体颗粒的速度也相对较大，再加上有的固体颗粒是直接来自叶栅流道主流区域的高速粒子，必然对这儿的叶栅壁面形成严重的磨损。从笛卡尔坐标系上来看，如果叶栅前缘在 z 轴附近，那么在具有相同半径的 S1 网格面上，压力面尾缘附近的 z 向坐标必然要低于前缘附近压力面的 z 向坐标。假设在叶栅入口流体、固体微粒的方向都是沿轴向的，由于固体粒子的流动惯性比气体大，则源自相同径向位置的气体微团和固体微粒，如果固体粒子不与壁面发生碰撞（假设固体粒子方向的改变是自身惯性、压力梯度、气固相互影响的作用引起来的），在出口由于外力作用它们在 z 向的变化量是不同的，气体的大，固体的小。从另一个角度来说，固体微粒方向的改变，是气流对它的作用力引起来的，那么由于几何参数的变化引起气体方向的变化量必然要大于固体微粒方向的变化量。

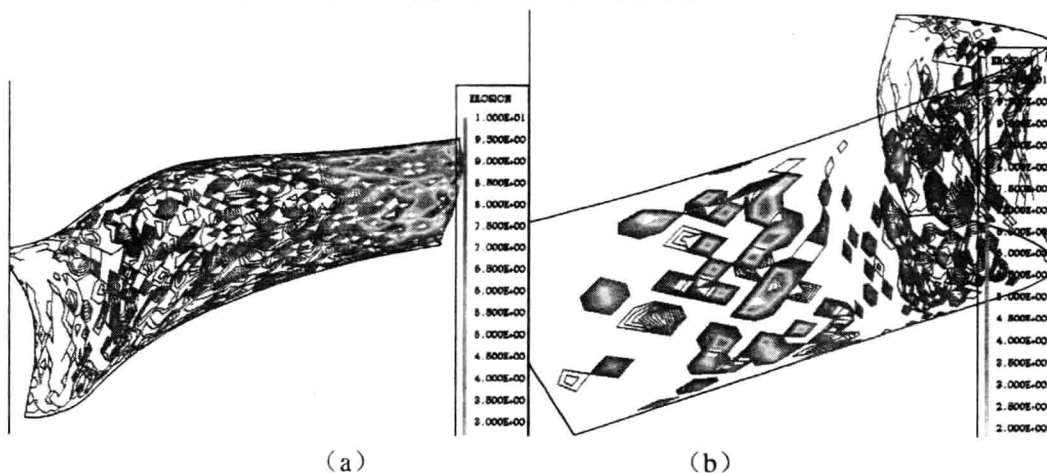


图 3 叶栅壁面的磨蚀率

使得出口更多的微粒撞击到压力面的中上部，形成图 3 中特有的斜坡形高磨蚀区域。对于吸力面的磨蚀，应该注意到来自压力面 50%-70%弦长处的反射微粒。在压力面 50%-70%弦长处(见图 2(b)，(c)，(d))，部分半径比较大的微粒经过压力面反射后，可以撞击到相邻叶栅的吸力面，对壁面的撞击角度有的在 20-45 度左右。对于塑性材料，在冲击角为 30 度时有最大磨蚀率，因为塑性材料在低角度高速度冲击下，有利于切削

或挤伸等塑性磨蚀方式的进行。因此，一方面，吸力面的入射粒子具有有利于磨蚀进行的角度，另一方面，在叶栅的中后部，叶栅内的气流是加速的，微粒在气流的作用下，也获得比较高的速度，入射微粒具有比较大的速度，因此在吸力面上发生二次碰撞的区域是磨蚀效果比较严重的区域，不过这一区域的范围比较小。吸力面上的其他地方，由前面的分析可知，发生一次碰撞作用的地方仅局限于叶栅的柱型前缘附近，因此吸力面上很大范围内的壁面上，磨蚀率是相对低的。

4 结论

①固体微粒对叶栅壁面的侵蚀作用主要出现在流道中后部的压力面上，在这一位置磨蚀沿叶展方向的分布是不均匀的，在中部偏上的地方磨蚀最为严重，中部偏下的地方稍微轻一些，呈斜坡状分布。

②在叶栅吸力面上出现的磨损，是由压力面上反射来的大直径微粒造成的，小直径微粒不对压力面形成磨损，换言之，吸力面上的磨损是由于二次撞击形成的，吸力面不存在一次直接撞击磨损。

参考文献

1. 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”, 动力工程, vol.23, No.4, 2003.
2. 戴丽萍, 俞茂铮, 王贤钢等, “超临界汽轮机调节级喷嘴固体颗粒冲蚀特性的预测与抗冲蚀方法”, 汽轮机技术, Vol.44, No.6, 2002
3. W.J.Scmmner, J.H.Vogam ,R.J.Linder. Reducing Solid Particle Erosion Damage In Large Steam Turbine[C]. Proceeding of American Power Conference. Vol.47 ,1985

锥柱航行体绕流数值计算研究

权晓波¹ 杜建一² 刘芙群¹ 朱学昌¹ 徐建中²

(1 中国运载火箭技术研究院总体设计部, 北京, 100076;

2 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

联系电话: 010-68382420 Email: mjxiaoboq@sina.com

摘要 气动力设计是锥柱航行体设计的重要组成部分。本文采用数值算法对航行体绕流问题进行了计算研究, 并与风洞试验结果进行了对比。计算结果与试验值吻合较好, 验证了数值算法的准确性。同时得到了绕流的某些运动规律, 研究结果对工程设计起到了一定的帮助作用。

关键词 航行体 绕流 数值计算

1. 前言

航行体在运动时, 作用在其上的流体动力是多种多样的, 往往需要综合考虑航行体的机动性能和飞行阻力等条件, 同时保证一定飞行范围内航行体运动的稳定性, 因此提供准确的受力参数至关重要的。以往大多通过风洞试验来测定力、力矩等系数。由于风洞试验周期较长, 随着现代科技的发展, 计算手段的发展为绕流在数值计算方面的进一步研究提供了可能性。

本文采用数值模拟方法对航行体绕流问题进行了计算研究, 在力、力矩系数、压强系数等关键数值结果上, 与试验数据进行了对比分析, 获得了比较理想的结果。并得到了某些规律, 使我们对绕流的认识能前进一步。

2. 计算模型

航行体三维流场计算采用 Fluent 通用软件。流动控制方程为常规的三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程。为节约计算时间, 湍流模型选取 S-A 单方程模型。采用理想流体状态方程, 用耦合求解方法求解基本方程。由于需要模拟航行体上微小尺度的凸起物对气动力的影响, 需要部分网格加密为保证计算精度, 同时考虑计算机容量容许范围, 采用结构化网格, 选用了 100 万计算节点。取远场边界条件。对不同 Mach 数、不同攻角、

不同滚转角的多种工况进行了数值模拟与分析。图 1 与图 2 显示了计算所采用的网格局部分布情况。

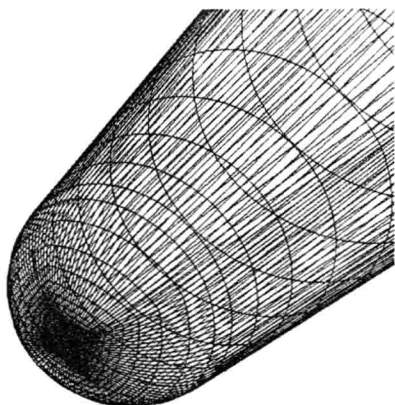


图 1 头部网格

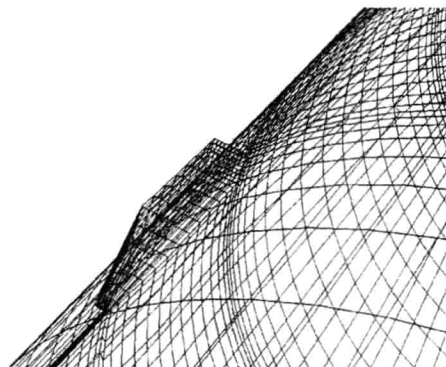


图 2 航行体局部网格

3. 计算结果及分析

3.1 阻力特性计算

气动阻力是衡量所选外形气动特性重要指标之一，由于航行体一级飞行段飞行速度头非常大，气动阻力引起的航程损失主要在一级飞行段。表 1 为计算得到的阻力系数与试验结果的对比，从表中可以看到计算结果与试验结果比较接近，在误差允许范围内，验证了计算的精度。

表 1 阻力系数计算值与试验值的比较

Tab.1 Comparison of resistance coefficients values between calculation and experiment

马赫数	计算结果	风洞试验结果
1.5	0.3499	0.3208
2	0.3108	0.3026
3	0.2032	0.2247
4	0.1585	0.1845
8	0.0740	0.0773

3.2 法向力和压心特性计算

相对于质心的气动俯仰力矩特性是衡量所选外形气动特性的另一重要指标，表 2-3 为计算得到的法向力系数、压心系数与试验结果的对比，从表中可以看到计算结果与试验结果比较接近。由于一级飞行段最大速度头出现在 $Ma=3$ 左右，所以对该马赫数下的气动俯仰力矩特性进行分析具有代表性。航行体飞行过程中弹体质心是变化的，所以通常气动设计给出的是法向力系数和相对理论端点的压力中心系数。法向力系数和压心系数的综合特性确定了弹体俯仰方向的稳定性。

表 2 法向力系数计算值与试验值的比较

Tab.2 Comparison of normal force coefficients values between calculation and experiment

攻角	计算结果	风洞试验结果
2	0.1213	0.10687
4	0.2604	0.24198
6	0.4301	0.43222
8	0.6617	0.69704

表 3 压心系数计算值与试验值的比较

Tab.3 Comparison of center of pressure coefficients values between calculation and experiment

攻角	计算结果	风洞试验结果
2	0.33270	0.27159
4	0.34878	0.31415
6	0.36861	0.36815
8	0.41278	0.41678

由计算结果可见,在小攻角范围内,阻力系数、法向力系数均随攻角增大而非线性单调上升。压心随攻角增大而逐渐前移,由于航行体质心靠后,压心均在质心前,故属于静不稳定。

3.3 滚动对于航行体受力的影响

航行体在运动时,由于受到滚动力矩的作用,会产生滚动。滚动力矩是由弹上凸起物引起的,凸起物周围局部流场产生流动分离和激波振荡等,特别是有攻角情况下,凸起物引起的横向流动分离和体涡产生滚动力矩。表 4 为滚动角 22.5° 与无滚动角时的力系数和滚动力矩系数的对比,从对比结果可看出,滚动对于力系数和压心并无太大影响,但滚动力矩系数明显改变,将直接影响航行体的控制和姿态。需要说明的是如果航行体上配置数目不同的凸起物,滚动力矩将发生较大变化。

表 4 有滚转角的情况下计算结果对比

计算情况	法向力系数	滚转力矩
无滚转角	0.6784	0.00005
有滚转角	0.6697	0.00033

4. 结论

本文采用数值模拟方法对航行体绕流问题进行了计算研究,得到以下结论:

- (1) 在跨音速和高超音速条件下对航行体的不同飞行情况进行了计算,得到了力系数、压心系数等参数的一些变化规律。
- (2) 对带有滚动角的航行体绕流进行了数值模拟,得到了滚动对于航行体受力的影响规律。
- (3) 从计算结果与试验结果的比较情况可以看出,数值预报已经达到了一定精度,表明该湍流模型适合于现有硬件条件下的绕流计算。

参考文献

1. 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992. 662-681.
2. 马铁犹. 计算流体力学[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1986.
3. Smart K. and Trexler A., "Mach 4 Performance of Hypersonic Inlet with Rectangular-to-Elliptical Shape Transitions", J. of Propulsion and Power, Vol.20, No.2, 200-293
4. Gross A. and Weiland N., "Numerical Simulation of Separated Cold Gas Nozzle Flows", J. of Propulsion and Power, Vol.20, No.3, 509-519

离心压气机顶部进口条件对叶轮内部流动的影响^{*}

戴冀 耿少鹄 黄伟光

中科院工程热物理研究所, 100080

Tel:010-62569759, E-mail:dj@mail.etp.ac.cn

摘 要

对于带分流叶片的离心式压气机叶轮,在顶部边界层亏损和喷气等进口条件下对叶轮内部流场进行了CFD数值模拟,观察了工程上简化进口条件可能对内部流场所产生的影响,并对比分析了进口喷气处理对改善内部流动、提高稳定性的机理。结果显示:叶轮进口处的顶部边界层主要影响到间隙流特性,较大的顶部亏损将加大间隙损失的发生;在进口叶顶附近进行喷气处理时,顶部间隙涡流得到了有效地控制,且降低了间隙损失的发生,有助于提高流动的稳定性的,但在下游区域这种作用逐渐消失。

1 前 言

旋转失速是困扰叶轮机械工业界的难题,也是推动当今流动失稳机理研究的主要动力。在这方面的探索中,叶尖喷气作为控制压气机失稳和改进性能的新方法近年来受到了很大的关注,研究结果显示在一定程度上可以达到控制失稳的目的^[1-4]。离心压气机在众多的工业领域都得到了非常广泛的应用,与轴流压气机相比,其三维空间形状使内部间隙流以及二次流结构都更加复杂,且失速的表现形式更为变化多样,仅就喷气实验看,公开发表的结果还不多^[5-6]。

当代计算流体力学为我们提供了一条 CFD 数值模拟的先行研究途径,对于离心压气机所特有的复杂流动现象,与实验比较数值模拟是一条更为便捷的研究途径^[7-9]。因此,本研究先以 CFD 方法数值计算小流量下不同进口条件时叶轮内部三维流场,通过计算结果的分析和比较,更加深入地了解喷气对改善内部流动、增进稳定性的机理和作用。与此同时通过分析进口管道边界层阻塞对内部流场的影响,有助于改进 CFD 方法在实际工程中的应用。

^{*} 国家自然科学基金 50276059 资助项目

2 计算方法

数值计算使用了Baldwin-Lomax代数湍流模型和壁面函数处理、以时间推进和人工粘性法求解三维定常雷诺平均N-S方程^[10]。H型网格在子午、回转和盘盖方向的网格数为98×48×52，顶部间隙网格数8。

计算选取了一个变型设计的带分流叶片的离心压机级，主要叶轮参数为：进口轮盘侧直径 $D_{1h}=120\text{mm}$ 、进口轮盖侧直径 $D_{1s}=290\text{mm}$ 、出口直径 $D_2=400\text{mm}$ 、出口角 $\alpha_{2b}=60^\circ$ （切向度量）、出口宽度 $b_2=26\text{mm}$ 、主叶片数10、分流叶片数10、转速14000r. p. m.、叶轮出口采用无叶扩压器。图1显示了CFD计算得到的本叶轮的性能曲线。本文的计算工况选择在小流量区域，以此反映近失速区域的流动特性。

计算采用了三类五个计算条件。一是进口气流完全均匀分布，即进口沿径向各位置处总压与标准总压的比 $P_t/P_0=1$ ，其它流动参数也完全均匀分布，此计算标记为O，通常在工程计算中，在不必精确分析的前提下可简单地使用这一条件；第二类条件是考虑进口管道所造成的边界层亏损和阻塞，根据强度的不同分别使用了如图2-a)所示B1和B2两个进口分布条件，显然B2的边界层大大强于B1，计算时保持了流量的相等；第三类条件是在进口叶顶处进行喷气处理，如图2-b)所示，这里暂时只考虑沿周向均匀喷气的情形，计算条件J1和J2分别对应于5%和10%喷气量（相对于此工况点的流量）。

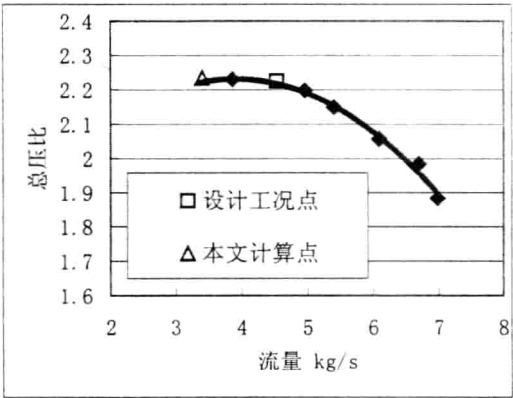
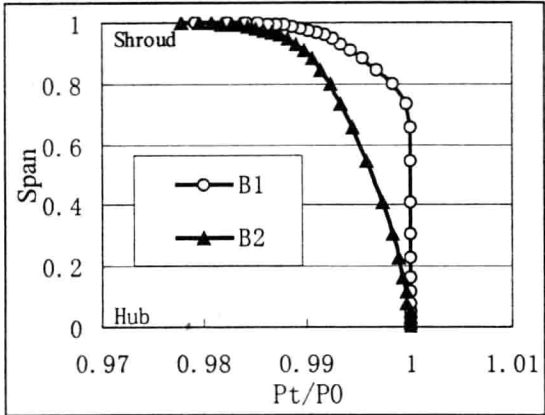


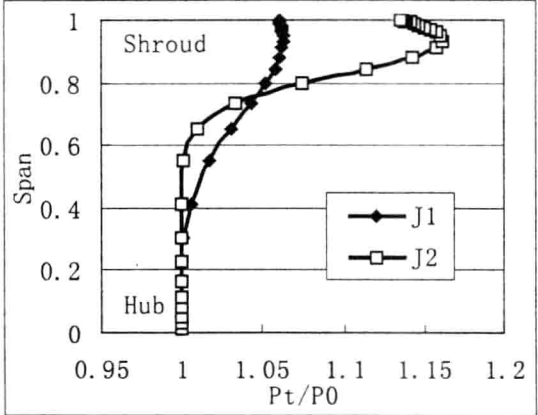
图 1. 叶轮性能曲线

3 结果和分析

选取叶轮进口区域分流叶片的前缘位置，显示出五个计算条件下回转方向



a) 进口管道边界层阻塞条件



b) 进口叶顶喷气条件

图 2. 不同进口条件的比较