

中国工程热物理学会

热机气动热力学学术会议

论文集

二〇〇七

绍兴

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. 数值模拟方法的研究和应用

- 072005 气体混合流动的 DSMC 方法模拟.....祁志国 杜建一 徐建中 张震宇(1)
- 072006 离心压气机叶片前缘几何形状对性能的影响.....
.....初雷哲 杜建一 赵晓路 徐建中(10)
- 072010 进口热斑径向作用位置对无导叶对转涡轮高压级温度场的影响.....
.....赵庆军 杨 中 王会社 赵晓路 徐建中(15)
- 072026 不同 CFD 软件对涡轮数值模拟的对比研究.....王俊理 李晓东 黄玉娟(22)
- 072027 带蜗壳离心压气机级全工况数值模拟.....
.....胡良军 杨 策 何义团 祁明旭 马朝臣(27)
- 072028 单喷口射流控制扩压器内边界层分离流动研究.....
.....程新萍 杨 策 刘竞飙 胡良军 马朝臣(35)
- 072032 涡轮叶栅气热耦合的数值方法与验证研究.....
.....颜培刚 董 平 周 驰 冯国泰(42)
- 072036 浓度场随机对流扩散过程的数值仿真.....吴文权 任孝安(48)
- 072039 预旋对蜂窝密封内流动传热特性影响的研究.....晏 鑫 李 军 丰镇平(55)
- 072046 向心透平叶轮顶部间隙泄漏流动特性分析.....牛久芳 邓清华 丰镇平(61)
- 072051 扩压叶栅二维流动分离的数值模拟.....张华良 董学智 谭春青 王松涛(67)
- 072054 叶尖孔等内部结构对空冷叶片换热和流动影响的数值模拟.....
.....苏 生 胡 捷 刘建军 安柏涛(74)
- 072056 一种新的非轴对称端壁成型方法在弯曲静叶栅中的数值模拟.....
.....汪传美 李国君 田 辉 李 军(79)
- 072059 轴流透平与排汽系统间流场相互作用研究.....付经伦 周嗣京 刘建军(85)
- 072060 端壁相对转动对涡轮间隙流动的影响.....牛茂升 臧述升 黄名海(97)
- 072064 Spalart-Allmaras 湍流模型在平板计算中的应用.....江小松 刘建军(104)
- 072065 壁面冷却对高超声速进气道抗反压能力的影响.....常军涛 于达仁 鲍 文(109)
- 072066 OWC 波能装置冲击式透平的计算流体力学分析.....
.....刘 臻 史宏达 金吉元(115)
- 072067 原油储罐进油口冲蚀失效的流动仿真分析.....
.....偶国富 金浩哲 徐金苏 徐如良 肖 宇 赵柏鑫 韩子兴(120)
- 072075 对间断函数的全局描述及处理间断问题的 Chebyshev-tau 方法.....
.....梁 岸 孙晓峰(124)

072077	1+1 对转涡轮热痕迁移现象的数值研究·····	王宝臣 季路成(132)
072080	全速度 Roe 格式低速性质解析证明·····	李雪松 顾春伟(139)
072081	全速度 Roe 格式模拟跨音压气机转子流场·····	李雪松 奉 凡 顾春伟(145)
072082	有大分离的压气机高压级静叶的分离涡模拟研究·····	李雪松 顾春伟(151)
072083	某离心叶轮的 CFD 分析和结果确认 第一部分:大流量点的结果确认·····	李 想 顾春伟(158)
072084	某离心叶轮的 CFD 分析和结果确认 第二部分:设计点的计算结果分析·····	李 想 顾春伟(164)
072091	DES 模型在压气机叶栅中的应用研究·····	顾春伟 陈美兰 李雪松 奉 凡(170)
072093	热传导对微型涡轮动叶性能影响的数值模拟·····	沈煜欣 刘建军(176)
072102	涡轮气热弹耦合数学模型进一步研究·····	郭兆元 周 驰 王 强 冯国泰(182)
072110	涡轮叶栅前缘槽缝气膜冷却的数值模拟·····	王晓东 康 顺 乔艳春(189)
072111	150MW 汽轮机低压缸末两级三维流动的数值模拟·····	戴丽萍 蔡 虎 康 顺(195)
072113	具有交替大小肋片方腔通道换热性能的数值研究·····	苏 生 胡 捷 刘建军 安柏涛(200)
072115	顶隙吹吸对跨音速轴流压气机特性的影响·····	祁明旭 马朝臣(206)
072120	温度梯度对平板边界层转捩影响的数值模拟·····	董 平 颜培刚 黄洪雁 冯国泰(212)
072123	顶部间隙对跨音风扇性能影响的数值研究·····	姜 斌 王松涛 孙玺淼 王仲奇(219)
072131	任意马赫数流动的预处理多重网格求解·····	杨 中 徐建中(225)

二. 设计及优化

072001	扩压叶栅中弯叶片作用气动机理的探讨·····	张永军 王会社 徐建中 冯国泰(232)
072003	高压比旋转冲压叶轮研究·····	肖 翔 赵晓路 徐建中(238)
072004	1+1/2 对转涡轮高压导叶前缘气膜冷却数值研究·····	张 惠 王会社 徐建中 赵晓路(244)
072007	高负荷对转压气机基本分析及设计·····	刘锡阳 赵晓路(251)
072008	1+1/2 对转涡轮高压动叶气膜冷却数值研究·····	张 惠 王会社 徐建中 赵晓路(259)
072015	爆炸加工阻波器自然通风的三维数值模拟研究及结构优化·····	吕继绍 白敏丽 李晓杰 秦小勇 王 军 丁盛华 闫鸿浩(267)

072016	一种改进的 Nash 分解法及其在压气机气动优化中的应用	王保国 刘淑艳 李翔 梅文晓 林欢	(273)
072019	高负荷低压涡轮的多级气动优化设计	赵洪雷 韩万金 谭春青	(283)
072023	双级矿井风机的设计与内流研究	谢军龙 鲁芬 江巨成	(290)
072029	轴流压气机内部流动失稳及机匣处理扩稳机理探索 第一部分: 流动失稳 触发机制	卢新根 朱俊强 黄伟光 聂超群	(295)
072030	轴流压气机内部流动失稳及机匣处理扩稳机理探索 第二部分: 机匣处理 扩稳机制与准则	卢新根 朱俊强 黄伟光 聂超群	(301)
072033	冲角变化对涡轮静叶栅流场的影响	周逊 韩万金 王祥锋 王仲奇	(307)
072034	自由尾迹法在风力机气动性能预测中的应用	沈昕 竺晓程 杜朝辉	(315)
072037	6106 柴油机性能研究及优化	邵治家 白敏丽 吕继组 王宇	(321)
072041	跨声速风扇流场中弯叶片抗畸变能力研究	孙鹏 钟兢军 冯国泰	(329)
072043	间隙流动特征对轴流压气机转子失速起始的影响	吴艳辉 楚武利 张燕峰	(345)
072047	厘米级微型燃机向心透平初步设计与数值分析	付雷 邓清华 丰镇平	(350)
072048	应用控制理论的叶栅气动反设计	李颖晨 丰镇平	(356)
072050	三维跨音速叶栅自动气动优化设计	罗常 宋立明 李军 丰镇平	(362)
072052	某型燃机涡轮过渡段流场优化设计	孙志刚 谭春青 张冬阳	(367)
072053	弯叶片对压气机流动稳定性影响研究	董学智 张华良 谭春青	(372)
072055	透平导叶闭式蒸汽冷却方案研究	胡捷 苏生 刘建军 安柏涛	(378)
072058	对旋升力风扇的设计分析研究	张新敬 孙志刚 谭春青 陈海生	(386)
072061	湍流模型在压气机转子尖区流动模拟中的对比研究	柳阳威 刘宝杰	(393)
072062	高比转速斜流叶轮根尖加功量分配的影响分析	高星 刘宝杰	(401)
072069	单级跨音速吸气式压气机叶型设计与分析	罗建枫 朱俊强	(408)
072072	一种涡轮叶栅内部流动控制方法	刘火星 杨旸 邹正平	(417)
072078	汽轮机排汽系统优化设计与分析 I—参数化造型及优化方法	陈川 付经伦 刘建军	(423)
072079	汽轮机排汽系统优化设计与分析 II—优化设计实例与分析	陈川 付经伦 刘建军	(429)
072085	轴流压气机动叶和静叶的 3D 优化设计	顾春伟 马文生 许超 奉凡	(438)
072088	考虑静叶根部气封泄漏的多级 3D 叶片优化设计	马文生 奉凡 顾春伟	(444)

072092	掠对压气机跨音级性能的影响	许超	顾春伟	(450)
072095	静叶前缘气膜冷却特性的数值模拟研究及优化设计			
		刘捷	安柏涛 蒋洪德 刘建军	(455)
072096	轴流式压气机多排叶片全工况性能优化	陈志鹏	袁新	(465)
072098	间隙高度对涡轮叶顶间隙流动的影响	牛茂升	臧述升 黄名海	(471)
072105	变稠度大折转角弯曲扩压叶栅数值优化	陈绍文	陈浮 王仲奇	(479)
072106	几何参数影响二维大折转角压气机叶栅扩压性能的数值研究			
		陈浮	郭爽 陆华伟 王仲奇	(484)
072108	脉动冷却流对孔出口附近流动结构影响的探讨	康顺	马丽	(489)
072109	叶根倒角对离心叶轮气动性能的影响	康顺	孙丽萍	(494)
072114	可变几何轴对称进气道初步设计	伊卫林	岳连捷 季路成	(499)
072116	多目标优化设计方法在翼型气动优化中的应用研究	王宏亮	席光	(506)
072117	离心式制冷压缩机级内流动数值模拟及其改进设计	王志恒	席光	(513)
072118	气冷涡轮 S_2 流面优化计算方法及应用			
		温风波	王松涛 冯国泰 王仲奇	(518)
072119	分层次的考虑冷气掺混的涡轮气动优化设计体系			
		温风波	王松涛 冯国泰 赵洪雷 王仲奇	(526)
072121	考虑冷气掺混和变比热的燃气涡轮一维气动优化设计			
		温风波	王松涛 冯国泰 王仲奇	(533)
072122	低反动度附面层抽吸式压气机及其内部流动控制			
		王松涛	羌晓青 冯国泰 林伟春 王仲奇	(539)
072124	高负荷氦气压气机气动参数及流动特点分析			
		王松涛	陈莹 徐立民 马胜远	(549)
072125	亚声速附面层抽吸式扩压叶栅抽吸方案及结构研究			
		羌晓青	王松涛 林伟春 王仲奇	(556)
072126	跨音速涡轮静叶弯曲对压力场及损失的影响			
		王凯	王松涛 冯国泰 王仲奇	(563)
072128	叶片尾缘扰流柱强化冷却的数值研究		边家亮 黄洪雁	(570)

三. 实验研究

072002	短周期实验台涡轮机匣换热实时测量初探	周勇	赵晓路 徐建中	(576)
072009	IET 短周期涡轮实验台涡轮模拟高空性能试验研究			
		秦立森	赵晓路 唐菲 杨中 徐建中	(585)
072011	带有缩放型流道动叶的涡轮级性能研究			
		王会社	张惠 赵庆军 唐菲 赵晓路 徐建中	(593)

072013	超临界高压动叶栅壁面静压分布的试验研究·····	冯子明 韩万金 钟兢军(599)
072017	风力机叶片沿展向绕流流场的 PIV 测试·····	·····高志鹰 汪建文 韩晓亮 韩 炜 曲立群 宋 力(605)
072018	V 型小翼对风力机动力放大特性影响的优化实验·····	·····汪建文 韩 炜 闫建校 韩晓亮 曲立群(609)
072021	前缘弯掠二叶轴流风轮内流特性分析与实验研究·····	·····游 斌 伍光辉 程志明 马 列 张 敏 吴克启(614)
072031	引射器入口形状对 PDE 的性能影响实验·····	·····黄希桥 严传俊 邓君香 范 玮 王治武(619)
072035	汽轮机组低压排汽缸气动性能的数值与 PIV 实验研究·····	·····王红涛 竺晓程 阳 红 周代伟 杜朝辉(627)
072038	四气门柴油机进气门口流场的热线测量·····	·····许俊峰 白敏丽 周 龙 吕继组 刘书亮(636)
072040	低环温空气源热泵系统的试验研究·····	·····李园园 申 江(643)
072045	吸气式脉冲爆震发动机喷管试验研究·····	·····王治武 严传俊 黄希桥 熊 姹 牟园伟 涂洪妍(650)
072063	近失速状态下压气机静子通道内部三维复杂流动研究·····	·····于贤君 刘宝杰 张志博 赵 斌(657)
072070	低速压气机叶栅吸力面附面层分离的实验研究·····	·····雷志军 朱俊强 王明杰(665)
072071	介质阻挡放电等离子体流动控制实验研究·····	·····李 钢 聂超群 李轶明 李汉明 张 翼 徐乐亭 朱俊强(674)
072086	喷流噪声控制方法实验研究·····	·····庄家煜 李晓东(681)
072094	不同复合角对平板气膜冷却特性影响的实验研究·····	·····刘 捷 韩振兴 蒋洪德 刘建军 周嗣京(687)
072104	孔隙射流位置对直扩压叶栅壁面静压及流谱影响·····	·····陈 浮 冯冬民 傅丽鹏 王仲奇(695)
072107	压气机近喘工况下弯曲静叶改善流场的实验研究·····	·····陆华伟 陈 浮 万继林 王仲奇(700)
072129	叶片端部孔隙结构对透平叶栅气动性能影响的试验研究·····	·····刘 红 姚 君 徐大懋(705)
072130	叶片表面粗糙度对透平叶栅气动性能影响的试验研究·····	·····姚 君 刘 红(711)
072132	暂冲式短周期试验台的涡轮流量测量·····	·····唐 菲 秦立森 赵晓路(716)

四. 非定常流动和气动声学及其它

- 072012 缘线匹配主导的叶轮机非定常设计.....季路成 王彦荣 邵卫卫 王宝臣(724)
- 072014 空穴流动的大涡模拟及使用多孔介质的气动声学控制.....
.....赖焕新 苏永升 周邵萍(736)
- 072024 基于 Lilley 方程射流噪声的研究.....甘加业 吴克启(744)
- 072025 三维串列双圆柱绕流气动流场及声场模拟.....
.....刘 敏 刘 飞 胡亚涛 甘加业 王嘉冰 吴克启(749)
- 072042 跨音速轴流压气机近失速状态间隙泄漏流非定常流动研究.....
.....张燕峰 楚武利 吴艳辉 卢新根(755)
- 072044 贯流风机涡结构与噪声特性的数值研究.....
.....刘 飞 王嘉冰 胡亚涛 刘 敏 甘加业 吴克启(761)
- 072049 非定常叶顶间隙泄漏流动和换热的数值研究.....杨佃亮 丰镇平(766)
- 072057 用 HQ 管抑制管道风扇噪声的数值模拟.....洪志亮 王同庆(772)
- 072068 跨音速轴流压气机转子叶顶泄漏流的数值研究.....
.....杜 娟 林 峰 张宏武 黄伟光(780)
- 072073 关于热声不稳定现象的一种控制方法...李 磊 郭志辉 张澄宇 孙晓峰(791)
- 072074 流管声传播的三维模态计算方法.....王 利 管 莹 赵小见 王同庆(798)
- 072076 非定常机匣处理扩稳实验研究.....孙大坤 刘小华 孙晓峰(804)
- 072087 微孔共振腔吸声机理的直接数值模拟研究.....林大楷 李晓东 孙晓涛(812)
- 072089 DES 模型在压气机亚音转子中的应用探讨 Part 1: 时均结果分析.....
.....顾春伟 奉 凡 李雪松 陈美兰(820)
- 072090 DES 模型在压气机亚音转子中的应用探讨 Part 2: 变工况与瞬时流场分析
.....顾春伟 奉 凡 李雪松 陈美兰(826)
- 072097 旋转进口畸变条件下轴流压气机叶顶间隙流非定常特征及其与旋转失速关
联性研究.....张靖焯 林 峰 陈静宜 聂超群(831)
- 072099 有限长管道声衬的参数优化设计研究.....杨 兵 王同庆(839)
- 072100 提高气冷涡轮气热耦合计算精度的措施 I 计算网络、热物性、能量方程封
闭方法、热辐射.....王 强 董 平 姜 澎 颜培刚 冯国泰 王仲奇(847)
- 072101 提高气冷涡轮气热耦合计算精度的措施 II 湍流模型与转捩模型.....
.....王 强 董 平 郭兆元 王松涛 冯国泰 王仲奇(855)
- 072103 超临界调节阀开启过程二维非定常数值模拟研究.....
.....王振峰 黄鸿雁 韩万金(863)
- 072127 弯掠动叶对跨声轴流压气机非定常气动负荷的影响.....
.....毛明明 宋彦萍 王仲奇(868)

气体混合流动的 DSMC 方法模拟

祁志国^{1,2}, 杜建一¹, 徐建中¹, 张震宇³

1. 中科院工程热物理研究所 北京 2706 信箱 100080

2. 中国科学院研究生院

3. 西安交通大学

Tel: (010)82543039 Email: qizhiguo@gmail.com

摘要 气体混合是 MEMS 应用中常常遇到的一个问题。本文采用直接模拟 Monte Carlo 方法研究了氮气和氧气在微尺度流动中的混合流动问题。两种气体分别以不同的速度, 相同的数密度进入, 当经过分割平板之后, 两种气体发生混合现象。在对结果的分析中发现, 进入速度对两种气体完全混合后的混合距离, 以及完全混合后的单组份所占混合气体的比例都会产生重要的影响。

关键字 气体混合, MEMS, DSMC

1. 引言

近几年来 MEMS (Microelectromechanical systems) 技术飞速发展, 其产品在航空航天, 生物等领域都有广泛的应用, 其中一些应用依赖于气体的流动特性, 准确了解流体在微尺度情况下的流动和传热特点, 对于设计出优良的 MEMS 产品是非常重要的^[1-3]。

由于特征尺度 L 的减少, 使得 Knudsen 数值较高。Kn 数定义为 $Kn = \lambda / L$, λ 为分子的平均自由程, L 为流动的特征尺度。当 $Kn < 0.01$ 时, 认为流动是处于连续流动区域; 当 $0.01 < Kn < 0.1$, 流动处于滑移区域; 当 $0.1 < Kn < 10$ 时, 认为流动处于过渡区域; 当 $10 < Kn$ 时, 流动处于自由分子流区域^[1,4]。由于一些 MEMS 器件的特征尺度极小^[5,6], 或者工作环境特殊, 气体的流动可能处于滑流和过渡区域。当气体流动处于过渡区域时, 连续性的假设不再准确, N-S 方程不适用于求解这一问题^[1]。

混合气体的运动比单纯的一种气体运动更加复杂, 不仅要考虑单组气体成分的运动, 还要考虑不同组分气体间的相互作用。在已往的研究中, 气体混合中的流动问题考虑的比较少。可以想象出, 在气体混合中会有新的现象出现。由于密度, 温度和压力的不同, 会引起质量和热量的流动, 以及不同组份气体之间的相互扩散^[7,8]。

对混合气体动力学属性的了解是非常必要的, 不仅是因为在实际应用中, 常常遇到的是混合气体流动问题, 而且在研究化学反应, 气体的混合与分离中都是非常必要的, 并且能够为设计诸如微型燃烧室等部件提供有意义的指导。在研究气体燃烧的问题中, 要保证气体燃烧能够稳定进行, 并且充分反应。则在点火前, 气体已经充分混合是非常必要的。随着 MEMS 的技术的不断发展, 对于微尺度气体混合过程的研究, 将会成为了一个热点问题。

传统的 CFD 方法基于宏观的连续性假设, 在对于微尺度问题的模拟中, 尤其是 Knudsen 数处于过渡流动领域的问题, 是无法求解的。一些学者从微观出发, 采用分子的观点提出了一些求解方法。Naris^[9]等人采用 McCormack 模型^[10], 研究了两种惰性气体的混合流动问题。问题假设两种混合气体通过二维的矩形槽道, 气体的运动由微小的压力梯度, 温度, 密度变化所引起。整个流动处于近平衡的流动状态。这一条件保证能

够采用线化的 Boltzmann 方程。为了减少计算时间，采用了经过优化的离散速度方法^[11]对模型进行求解。这种方法虽然具有计算速度高的优点，但是近平衡的假设还要求流动的压力，密度和温度处于变化不大的情况。因此限制了这种方法的使用范围。

在混合气体的模拟中，DSMC 方法具有优势。由于 DSMC 方法是跟踪代表大量真实粒子的模拟分子，因此对于混合气体的研究，只要追踪代表不同组份的模拟粒子即可。而且在模拟的过程中，能够对于不同的组份分别采样，不仅能够得到混合气体的流场特性，还能够得到单个组份的流动信息^[12]。

2. 模拟条件

2.1 流动的几何模型

模拟气体混合的流道模型如图 1 所示，氧气和氮气从入口处的上下两侧分别进入。图中 A 为分割平板，分割平板将这两种气体在进口处暂时分开，气体相当于是从两个不同的流道中分别流入。分割平板的长度为总长度 L 的 10%。进入时给定两种气体的数密度相同，分别改变两种气体的进入速度。出口处的压力保持不变，都为 1kPa。气体与固壁面发生的碰撞为完全漫反射碰撞，壁面的温度保持为 273 K；微流道几何尺寸为 $h \times L = 1\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}$ 。在模拟计算过程中，分子模型采用的是变径硬球模型（VHS）模型。

DSMC 方法在模拟的过程中，两种气体的属性如表 1 所示，进口处的两种气体数密度都相同，为 $n_\infty = 7.963 \times 10^{23}$ ，进口温度 $T_0 = 273\text{K}$ 。

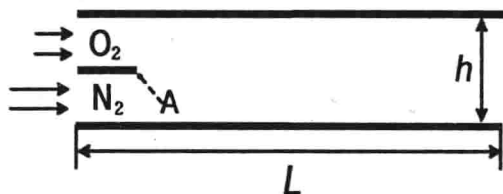


图 1. 气体混合流动的几何模型

表 1. 气体物理属性

气体种类	分子质量 ($\text{m} \times 10^{-26} \text{kg}$)	分子直径 ($\text{d} \times 10^{-10} \text{m}$)	粘性 ($\mu_{\text{ref}} \times 10^{-5} \text{Ns/m}^2$)	Kn_{in}
N_2	4.65	4.17	1.656	3.25
O_2	5.31	4.07	1.919	3.42

计算算例如表 2 所示，总共为 5 个算例，从两种气体的进入速度相同开始，然后保持一种气体的进入速度不变，改变另一种气体的进入速度。进入气体的流动速度越高，流场内的模拟分子数目也越多。

表 2 两种气体混合流动的算例

算例	$U_{\text{in}, \text{N}_2}$ (m/s)	$U_{\text{in}, \text{O}_2}$ (m/s)	模拟分子总数
1	100	1100	85006
2	100	300	134842
3	100	500	207268
4	300	100	128083
5	500	100	187533

2.2. 混合距离的计算

混合距离通过判断截面上气体的密度变化来求得。当两种气体完全混合的时候，截面上的气体密度应该是均匀的。但是 Fan 等人^[13]建议直接通过图像上的等值线变化来判断混合距离，这种判断非常主观。本文建议通过计算截面上密度变化的标准偏差来判断气体完全混合时的混合距离。

混合距离根据气体混合之后的密度变化计算得出，横截面上，密度的变化不大时，认为达到了完全混合。因此根据在横截面上各网格内的密度数值，求出密度 ρ 的平均值

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} \rho_i}{N_j} \quad (1)$$

其中， ρ 为网格内的气体密度， N_j 为截面上的网格数。通过计算截面上密度的总样本标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_j} (\rho_i - \bar{\rho})^2}{N_j}} \quad (2)$$

然后通过判断条件(3)来判断完全混合时的混合长度。

$$\sigma / \bar{\rho} < 0.5\% \quad (3)$$

因此在流场中，当条件(3)成立了，则认为这两种气体完全混合了。

3. 结果和讨论

3.1. 进口处流场分析

图 2 为氮气和氧气分别以相同的速度入口条件进入流道后的密度云图。由于氧气的分子质量比氮气的高，因此在相同的进入数密度条件下，氧气的密度比氮气的稍高，与图中所示一致。在经过流道的分割平板之后，两种气体发生混合。扩散现象表现为密度高的气体向密度低的气体进行扩散。从图中可以看出，扩散速度是非常快的，在离开分割平板后混合气体的密度即达到了一致。当上下两个平板处的气体数密度一致时，可以认为两种气体混合均匀了。

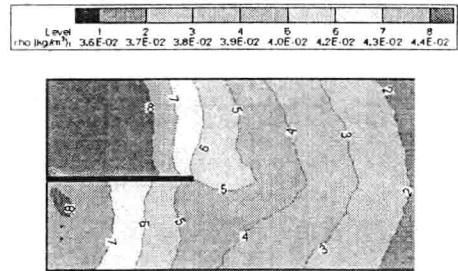


图 2 相同的进口速度时进口处密度云图

$U=100\text{m/s}$

图 3 为设定不同进入速度时进口处的密度云图。图 3(a), 3(b) 为仅仅改变氧气的进入速度时进口处密度云图。如图所示，氧气的进入速度为 200 m/s 时，由于壁面为漫反射壁面，高速的气体与壁面碰撞之后，速度下降，从而氧气进口处的密度增加，但是当两种气体开始混合的时候，密度又下降了。同时高密度的氧气向下壁面运动，随着速度的增加，两种气体的完全混合时的位置向下游移动，即混合距离增加了，如图 3(b)所示。

图 3(c), 3(d) 为氮气的不同进入速度的进口处的密度分布图。当保证氧气的进入速度

不变，仅增加了氮气的进入速度时，与只增加氧气的速度的变化趋势相同。图 3(c)中能够很明显的看出气体在经过分割平板之后的混合现象。而图 3(d)则表明两种气体的混合距离增加了。而图 3(b)和 3(d)则表明，这两种情况中，氮气和氧气的速度分别为 500 m/s，但是他们的达到完全混合的混合距离是不相同的。

图 4 为相同的进入速度时进口处温度云图 $U=100\text{ m/s}$ ，从图中可以看出当两种气体的进口条件完全相同的时候，流场中的温度场基本是对称的。但是，随着气体的流动，温度逐渐下降。大大低于了进口温度。图 5(a), 5(b)为仅改变氧气进口速度的温度分布图，在温度分布图中也显示了两种气体的混合过程。从图中可以看出，在给定较高的进入速度，其温度也较高。当沿着流动方向向下游运动时，温度较高的氧气经过分割平面后向下扩散，同时也将热量带入了下方，因此部分混合气体的温度升高了。但是受到扩散速度的影响，其温度的锋面呈圆弧状。

图 5(c), 5(d)为改变氮气的进入速度时，进口处温度场的云图。氮气的速度改变时引起的温度场的变化几乎和单独改变氧气的进入速度时一样，但是在未通过分割平板时，氮气的温度升高到的温度最大值没有氧气的高。

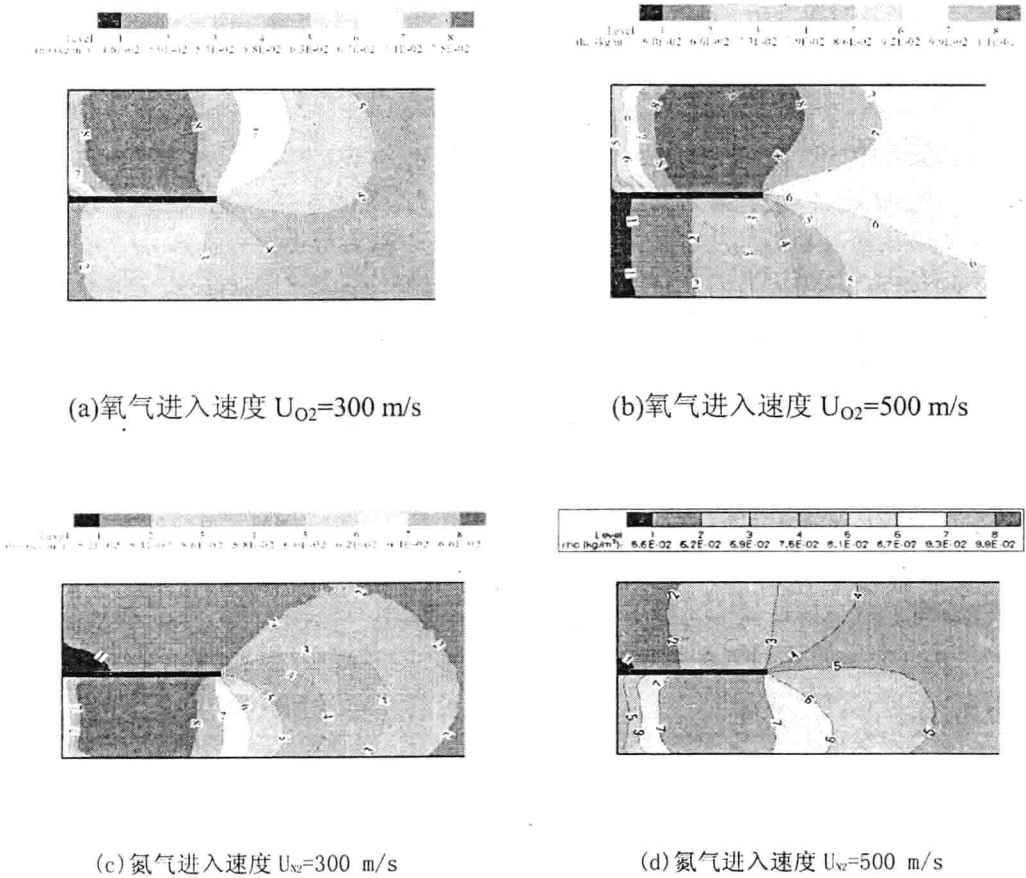


图 3 不同进入速度时的进口处密度云图

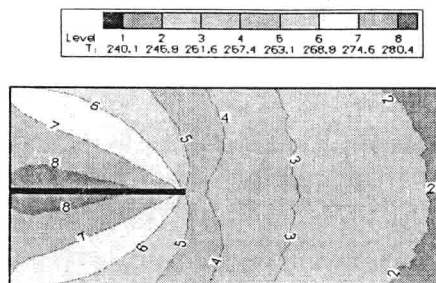
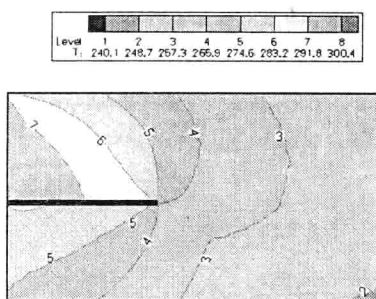
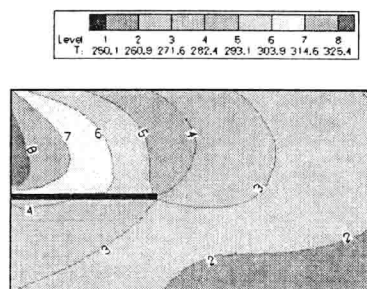


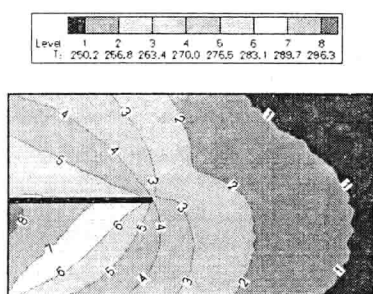
图 4 相同的进入速度时进口处温度云图 $U=100\text{ m/s}$



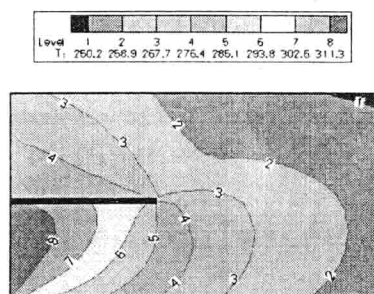
(a) 氧气进入速度 $U_{O_2}=300\text{ m/s}$



(b) 氧气进入速度 $U_{O_2}=500\text{ m/s}$



(c) 氮气进入速度 $U_{N_2}=300\text{ m/s}$



(d) 氮气进入速度 $U_{N_2}=500\text{ m/s}$

图 5 不同进入速度时的进口处温度云图

3.2. 速度矢量图

图 6 为进入速度相同时的进口处的速度矢量图。图中氮气的进入速度和氧气的相同，

气流在分割区域流动非常稳定。在经过分割平面之后，两种气体发生混合，由于不同气体之间的相对速度差别不大，因此速度场表现的非常稳定。

图 7 所示为给定不相同进入速度时的速度矢量图，为了简便起见，这里只列出了改变氧气的进入速度的速度矢量图。在图 7(a)中可以看出，氧气的进入速度为 300 m/s 时，其速度远高于氮气的进入速度，在由分割平板分割的区域中，气体流动的速度场是稳定的，但是经过分割平板之后，速度矢量受到气体扩散的影响而发生变化。正如图中所示，携带有较高速度的氧气分子向下方运动，从而带动低速的氮气分子的运动速度增加。图 7(b)为氧气的进入速度为 500 m/s 时的进口处速度矢量图。从图中可以看出，部分携带有较高速度的氧气分子在通过分割平板之后，迅速向下方运动，在与氮气分子发生碰撞之后，将部分动能传递给了低速的氮气分子。当混合充分之后，气体的速度趋于一致。从图中可以看出，沿流动方向，上下平板的速度越来越趋于相同。值得注意的是，高速的氧气同时还向氮气的进口处扩散，从而更加减小了氮气的进口处的速度，并且使得混合气体的流动方向是朝向氮气进口的。这一现象表明，高的氧气进口速度减少了氮气的进入流量，见第 3.4 节对混合气体中氧气所占比例的讨论。

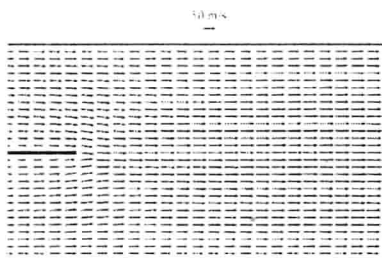


图 6 进口速度相同时的速度矢量图

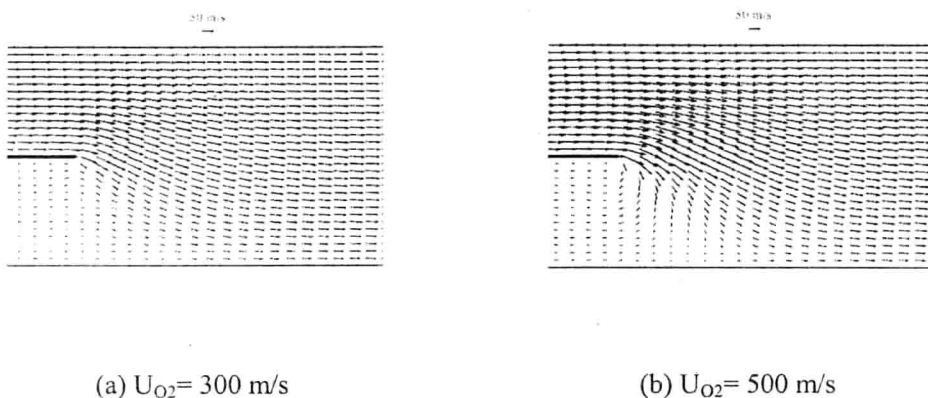
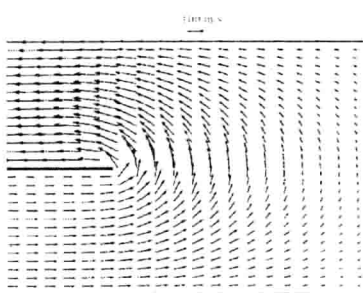


图 7 进口速度不相同时的速度矢量图

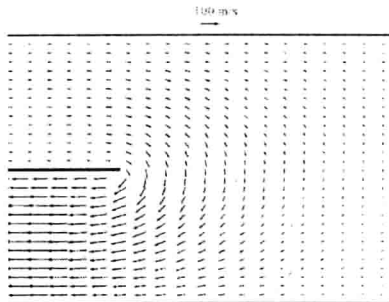
图 8 为单独考虑两种气体时的气体进口处的速度矢量图，选取的是算例 2，图 8(a) 为氮气进入流场中的扩散速度，不是混合气体的速度矢量。从图中可以看出，气体进入之后，当通过分割平板，气体绕过分割平板向另一中气体进口流动时的速度矢量。

3.3. 混合距离

图 9 所示为不同进口速度对混合距离的影响，混合距离的确定见第 2.2 节。图中混合距离根据流道的长度 L 进行无量纲化。通过对混合距离的研究，表明气体进口速度的增加会引起混合距离随之增加，这一点是与直观经验相符合的。但是当氮气和氧气的入口速度设定相同时，达到完全混合时的混合距离却不相同。氧气所需要的混合距离比氮气的长。



(a) N_2 的扩散速度



(b) O_2 的扩散速度

图 8 两种气体分别的速度矢量图

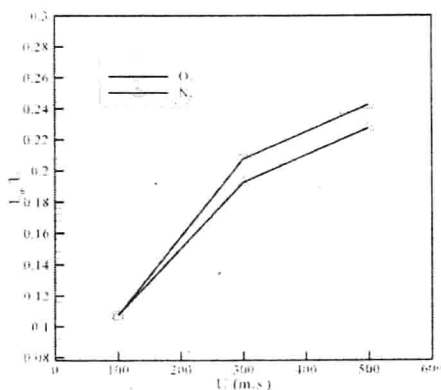


图 9 混合距离随进入速度的变化

3.4. 混合后气体比例

混合气体完全混合之后，每种气体所占有的比例与给定气体的进入速度相关。令 P_{O_2} 为完全混合后氧气所占的比例，两种气体进入时的数密度都为 n_∞ ，因此可以计算出混合气体中氧气的数密度比例为

$$P_{O_2} = \frac{n_\infty U_{O_2}}{n_\infty U_{O_2} + n_\infty U_{N_2}} = \frac{U_{O_2}}{U_{O_2} + U_{N_2}} \quad (4)$$

从图 10 中可以看出，算例中两种气体进入时的数密度都是相同的，当氧气进口处的速度从 100 m/s 到 500 m/s 时，混合气体中氧气的含量（数密度）则从 51% 增加到了 82%。当氮气的进口速度发生同样的改变时（这时氧气的进口速度为 100 m/s），氧气的含量呈现下将的趋势，其数密度所占的百分比从 51% 降到了 22%。氮气的变化趋势正好与氧气的相反。我们可以得出，气体的进口速度对其完全混合之后的数密度比例影响很大，较高的进入速度，能够增加其在混合气体中所占的比例。与分析解(4)的对比验证了这一趋势是正确的，但是具体的数值有些差距。这可能是进口处的高速气体对低速气体发生扩散作用时产生的影响。

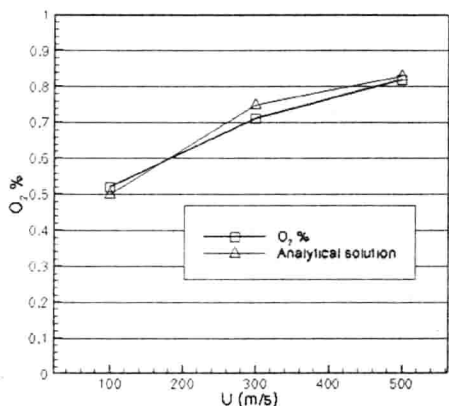


图 10 氧气进入速度变化时，完全混合后氧气的数密度占混合气体的比例

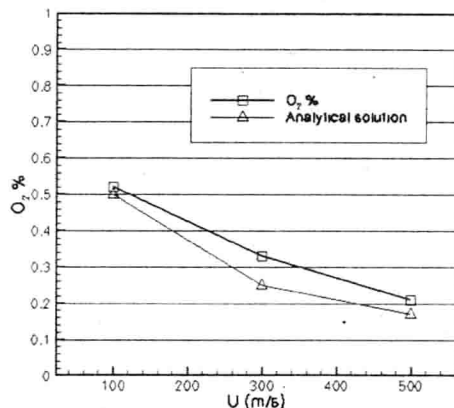


图 11 氮气进入速度变化时，完全混合后氧气的数密度占混合气体的比例

4 结论

采用直接模拟 Monte Carlo 方法对两种气体在微尺度下气体混合现象进行研究，主要研究了进口处气体的流场变化以及混合流动的特性，对模拟结果的分析中发现：

- 混合距离随进口速度的增大而增加，但是增加不是线性的。
- 完全混合后，单种气体占混合气体的比例与进口速度密切相关，进口速度大的气体所占比例相应较高。
- 两种气体速度差别大时，其扩散速度也大，并且，高速的气体会影响另一种气体的进入。

参考文献

- [1] Mohamed Gad el Hak. The fluid mechanics of microdevices - The freeman scholar lecture[J]. Journal of Fluids Engineering. 1999, 121:5-33
- [2] J. K. Robertson, Kensall D. Wise. Modeling a Microfluidic System Using Knudsen's Empirical Equation For Flow in The Transition Regime[J]. J Vac Sci Technol A. 2001, 19:358-364
- [3] Peter Woias. Micro Pumps - Past, Progress and Future Prospects[J]. Sensors and Actuators B. 2004, 9:394-401
- [4] 沈青. 稀薄气体动力学[M]. 国防工业出版社, 2003
- [5] E. Leclerc, K. S. Furukawa, F. Miyata, et al. Fabrication of Microstructures in Photosensitive Biodegradable Polymers for Tissue Engineering applications[J]. Biomaterials. 2004, 25:4683-4690
- [6] 贾宏新, 吴志勇, 方肇伦. 微流控芯片免疫分析方法研究进展[J]. 分析化学. 2005, 33(10):1489-1493
- [7] A. F. Mills. The Use of The Diffusion Velocity in Conversation Equation for Multicomponent Gas Mixtures[J]. Journal of Heat Transfer. 1998, 41:1955-1968
- [8] W.K. Matthes. Monte Carlo Simulation of Gas-flow Using MCNP[J]. Annals of Nuclear Energy. 2005, 32:1495-1508
- [9] S. Naris, D. Valougeorgis, D. Kalempa, F. Sharipov. Flow of gaseous mixtures through rectangular microchannels driven by pressure, temperature, and concentration gradients[J]. Physics of Fluids. 2005, 17:100607
- [10] Francis J. McCormack. Construction of linearized kinetic models for gaseous mixtures and molecular gases[J]. The Physics of Fluids. Dec. 1973, 16(12):2095-2105
- [11] S. Naris, D. Valougeorgis, F. Sharipov, D. Kalempa. Discrete velocity modelling of gaseous mixture flows in MEMS[J]. Superlattices and Microstructures. 35, 2004:629-643
- [12] 李正强, 王力, 蔡军, 吴平, 尚晓航. 氮氧混合气体在梯度磁场中流动的数值模拟[J]. 中国民航学院学报. 2005, 23(3):32-36
- [13] F. Yan, B. Farouk. Prediction of mixing of two parallel gas streams in a microchannel using the Direct Simulation Monte Carlo method[C]. Rarefied Gas Dynamics: 22nd International Symposium. 2001, 510-517

离心压气机叶片前缘几何形状对性能的影响

初雷哲^{1,2} 杜建一¹ 赵晓路¹ 徐建中¹

(1 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080; 2 中国科学院研究生院, 北京 100080)

联系电话: 010-82543039 E-mail: clzkkx@163.com

摘要: 本文采用数值模拟的方法研究了不同的叶片前缘几何形状对离心压气机性能的影响, 研究表明圆形前缘与钝头前缘相比能提高压气机的流通能力, 并使压比和效率有明显的提高, 但同时也会使得工作范围变窄, 而椭圆形前缘会使得性能得到进一步的提高。流场分析显示, 圆形前缘和椭圆形前缘可以减小叶片前缘造成的分离损失, 并减小出口尾迹的损失, 从而使得效率提高。采用圆形前缘和椭圆形前缘可以使得从分流叶片前缘位置往后的主叶片的载荷分布比较平均, 使得主叶片和分流叶片的载荷分布比较合理, 同时椭圆形前缘还可以使得分流叶片的做功能力增加。

关键词: 离心式压气机; 数值模拟; 前缘形状

1 引言

压气机的叶片前缘的几何形状会对进口处的流场产生很大的影响, 当来流气流角变化时, 不同的前缘形状会使得流动发生变化, 因而会对压气机的性能产生显著影响。所以, 研究叶片前缘不同几何形状对流场和性能的影响, 有助于改进压气机叶片的设计。叶片前缘形状在实际应用中也已经受到重视, 压气机叶片的前缘经常会采取修圆处理来改善流场。Valraevens 和 Cumpsty (1993) 研究了圆弧形前缘和椭圆前缘对叶片流动的影响, 指出椭圆形叶片前缘可以抑制附面层发展, 可以扩大叶片的攻角范围, 降低损失。陆宏志、徐力平用数值模拟的方法研究了压气机叶片前缘形状对叶片气动性能的影响。并设计了一种带凸台的圆弧形前缘, 可以减小加工难度同时达到改善启动性能的目的。本文将不同的叶片前缘形状应用到离心压气机中, 通过数值模拟的方法来研究其对流动和性能的影响。

2 研究对象和数值方法

本文的研究对象为一高压比的离心压气机级, 包括带分流叶片的叶轮和有叶扩压器。在保持其他的几何形状不变的情况下, 只对叶轮的主叶片和分流叶片前缘分别进行钝头、圆弧和椭圆三种方式进行处理, 其中椭圆处理时取 $a/b=2$, 以此来研究前缘几何形状的影响。所研究的离心压气机的几何形状如图 1 所示。

本文计算只进行了定常计算, 通过改变出口背压得到在设计转速下的完整的特性曲线。计算采用多块网格策略以保证整场网格质量, 叶尖间隙采用蝶型网格结构, 其他区域采用 H 型网格, 总网格数为 60 万左右, 网格结构如图 2 所示。本文计算采用 NUMECA Fine/Turbo 进行计算。湍流模型选用 Spalart-Allmaras 一方程湍流模型。计算时进口边界给定总温, 总压和气流角, 出口给定背压。固壁给定无滑移、绝热壁条件。

国家自然科学基金资助项目 (50476085)