

# 中国工程热物理学会

传热传质学学术会议

论文集（下册）

二〇〇四

吉林

中国工程热物理学会编



# 中国工程热物理学会

传热传质学学术会议

论文集 （下册）



Chinese Society of Heat and Mass Transfer

2004年 吉林

## 传热传质学学术会议论文集(下册) 目录

### 八. 数值模拟

- 043013 流动与传热对 NO<sub>x</sub> 吸收催化剂性能的影响.....谢捷鸿 彭晓峰(703)
- 043017 错排环布圆管翅片式换热板芯的计算研究.....樊菊芳 于永兴 王良璧(707)
- 043018 涡强化扁管管片散热器流动与传热的数值模拟.....孙东亮 王良璧(711)
- 043020 层流等离子体长射流的初步非平衡模拟.....王海兴 陈 熙 程 凯(717)
- 043021 超短脉冲激光在吸收散射介质中非稳态传播的蒙特卡罗模拟.....  
.....周建华 唐大伟(721)
- 043040 内螺纹肋管内流动与传热的数值模拟.....孙东亮 樊菊芳 王良璧(725)
- 043045 增压锅炉烟气流动与传热的数值模拟...贾红轶 姜任秋 李彦军 孙宝芝(731)
- 043048 增压锅炉对流管束换热数值模拟研究...王鹏涛 姜任秋 孙宝芝 李彦军(735)
- 043052 新型肘形进水流道三维紊流数值模拟.....朱红耕 袁寿其(739)
- 043053 固体氧化物燃料电池传热传质数值模拟.....宣益民 黄镜欢(746)
- 043055 确定复杂复合材料导热系数的新方法.....钱吉裕 李 强 宣益民(750)
- 043057 磁流体的 Lattice-Boltzmann 方法模拟.....宣益民 叶 萌 李 强(754)
- 043063 带肋气膜冷却平板的数值模拟研究.....陆 犇 姜培学(758)
- 043064 应用分离涡模型计算斜圆柱孔气膜冷却.....王扬平 姜培学(762)
- 043065 平板气膜冷却的数值计算.....王扬平 姜培学(766)
- 043066 基于低 Re 数二方程模型的发汗冷却问题的数值模拟.....  
.....孟丽燕 姜培学 蒋方帅 任泽霁(770)
- 043076 蒙特卡洛法研究随机表面光散射特性.....刘晓红 阮立明(774)
- 043077 冷包助冷通道结构的数值模拟及优化...史亚蓉 谢公南 王秋旺 冯全科(778)
- 043078 CW 原表面通道流动与换热的数值模拟.....  
.....梁红侠 王秋旺 罗来勤 吴一宁 丰镇平(782)
- 043079 交错波纹原表面通道周期性流动换热的三维数值模拟.....  
.....柏 巍 王秋旺 罗来勤 丰镇平(786)
- 043080 子网格在 DSMC 中的应用及三角形子网格.....  
.....贺群武 王秋旺 罗来勤 陶文铨(790)
- 043081 紧凑换热器中波纹通道内流动与换热的数值研究.....  
.....谢公南 王秋旺 罗来勤(794)
- 043082 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 液体火箭发动机推力室再生冷却通道三维传热的大涡模拟.....  
.....吴 峰 王秋旺 罗来勤 孙纪国(798)
- 043085 微 Venturi 通道内气体流动特性的研究.....  
.....贺群武 王秋旺 罗来勤 陶文铨(802)
- 043087 三维复杂热结构热响应计算方法研究...贺立新 桂业伟 王安龄 张来平(806)
- 043102 冷轧钢卷退火过程粘结问题的数值研究.....赵 勳 杨永明(812)
- 043103 二维场协同式强化换热通道的数值模拟.....  
.....赵丽华 苑中显 张建国 姜明健(820)

- 043105 致密微孔壁复合冷却对流换热系数研究.....陈 焱 吉洪湖 胡娅萍(824)
- 043113 热弹性耦合问题中非 Fourier 热传导的有限元分析.....  
.....唐大伟 周乐平 吴邦贤 钱华山(828)
- 043117 具有内部热源的建筑物内空调环境的数值模拟.....  
.....章立新 王治云 杨 茉 顾建武 陈 双(832)
- 043123 带有绕流柱的偏劈缝结构尾缘气膜冷却的三维数值模拟.....  
.....刘 斌 凌长明 卢聪明(836)
- 043124 叶片尾缘冷却通道偏劈缝中绕流柱的位置对阻力及换热影响的数值研究...  
.....凌长明 吴学红 赵冬梅(842)
- 043125 靠背式测速探头标定的数值模拟研究...凌长明 植仲培 李 军 包幼林(848)
- 043129 过热器蒸汽流量分配规律数值模拟研究.....  
.....李志刚 姜任秋 李彦军 孙宝芝(852)
- 043131 一维非稳态热声波的数值研究.....周志杰 刘继平 严俊杰 种道彤(856)
- 043142 螺旋折流片换热器壳侧传热与流动的数值模拟...梅 娜 陈亚平 施明恒(860)
- 043145 新建架空管道启输过程传热计算研究.....吴国忠 陈 超(864)
- 043167 风冷冷凝器速度场的数值研究.....文 娟 刘金平 陈 军 张洪亮(869)
- 043170 盾构掘进隧道内耦合模型的数值模拟.....  
.....顾建武 章立新 杨 茉 陈 双 王治云 林宗虎(874)
- 043182 Date 压力修正算法在非结构化网格上的应用.....徐明海 陶文铨(878)
- 043183 非结构化网格的扩散通量计算方法评价.....徐明海(883)
- 043188 动态工况下棒状燃料元件温度场的计算.....黎浩峰 陈文振 高 明(888)
- 043190 近似积分法求解有限域的凝固问题.....刘爱萍(892)
- 043199 层状平板内热应力的计算研究.....黄 谦 桂业伟 耿湘人(896)
- 043208 微矩形流道中传热的数值模拟.....陈宝明 耿文广(901)
- 043217 脉动流动强化换热的数值研究.....杨卫卫 何雅玲 赵春风 陶文铨(906)
- 043219 插指型流道 PEMFC 的阴极两相流动数学模拟.....  
.....刘训良 谭雅巍 何雅玲 陶文铨(910)
- 043221 一种电子器件散热器简化模型及完全模型自然对流流动数值模拟及对比...  
.....高 健 陶文铨 何雅玲(915)
- 043222 翅片管束式管壳式换热器三维数值模拟研究.....李 欣 邓 斌 陶文铨(919)
- 043223 不同交错角 CC 型通道流动与换热的数值模拟...阴继翔 李国君 丰镇平(924)
- 043230 管内多纵向涡对湍流换热和阻力特性影响的数值分析.....  
.....孟继安 梁新刚 李志信(930)
- 043240 圆管内层流脉冲流对流换热的数值分析.....俞接成 李志信(934)
- 043248 突片对气膜冷却效果影响的数值研究.....姚 玉 张靖周 李永康(938)
- 043249 有初始横流冲击冷却的数值研究.....谭 蕾 张靖周 谭晓茗(942)
- 043250 实现格子 Boltzmann 模拟中压力边界的新方法.....王金库 李志信(946)
- 043252 微喷管数值模拟.....刘明侯 孙建威 李志亮 陈义良(950)
- 043261 周期波形通道中流动换热的数值研究.....张永海 阴继祥 丰镇平(957)

- 043265 非定常尾迹对气膜冷却影响的数值研究.....蒋雪辉 赵晓路(963)
- 043272 热磁对流的格子 Boltzmann 方法模拟.....宣益民 杨正东 李 强(970)
- 043277 吸附制冷间歇运行及起动的数值模拟.....王 文 王如竹(974)
- 043282 具有指数速度特征的连续延伸表面边界层动量和热量传输.....  
.....郑连存 陈学慧 张欣欣(978)
- 043283 正交梯度下双扩散对流的数值模拟.....石科峰 卢文强(983)
- 043292 行星式化学气相沉积反应器内对流涡旋的数值模拟研究.....  
.....左 然 张 红 刘祥林(989)
- 043304 超临界压力下水在水平管内传热特性研究.....徐 峰 郭烈锦 张西民(995)
- 043312 蔬菜冷藏包装箱内温度分布的数值计算.....  
.....宁静红 申 江 彭 苗 李慧宇 王长平(1003)
- 043313 室内低温地板辐射采暖的温度分布及湍流流动数值模拟.....  
.....马良栋 陶文铨 戴 颖 孙德兴(1011)
- 043314 蒸汽沿井筒流动过程压降及热损计算方法研究.....  
.....王志国 马一太 项新耀(1015)
- 043315 单热管 CPU 散热器冷凝翅片侧的数值研究.....唐连伟 刘迎文 何雅玲(1020)
- 043316 一种新型气液分离装置及其内部流动规律的理论分析解.....  
.....刘恒伟 刘中良 顾克宇 冯永训 颜廷敏(1024)

## 九. 测量及显示技术

- 043003 波壁管内流动不稳定性的实验研究.....卞永宁 贾宝菊 孙 宇(1028)
- 043012 外形分析-拟合求导法测接触角.....林志勇 王晓东 彭晓峰(1033)
- 043024 测定微流控芯片中流体温度及组分的电极法.....曲小鹏 刘 静(1037)
- 043059 不同光源条件下热敏液晶色温特性的实验研究.....  
.....韩振兴 周嗣京 刘 捷 刘 石 刘建军(1041)
- 043069 多孔材料内部结构的微 CT 扫描仪分析.....张 扬 彭晓峰(1047)
- 043107 自然对流下亲水表面上抑霜的研究.....  
.....王洪燕 张新华 刘中良 孟 声 马重芳(1051)
- 043130 木材结构对其传热特性影响的实验研究.....  
.....俞自涛 胡亚才 范利武 黄君丽 田 甜 方梦祥 岑可法(1055)
- 043150 微热探针法测量番茄果实不同成熟阶段导热系数的实验研究.....  
.....张 敏 张百强 孙治强 赵惠忠(1060)
- 043151 HCFC141b 气体水合物水平换热管外生长过程可视化研究.....  
.....谢应明 郭开华 梁德青 樊栓狮 顾建明 马晓林(1069)
- 043247 自耦合射流速度分布的试验研究.....谭晓茗 张靖周(1075)
- 043267 微细尺度流场显示的高灵敏度莫尔偏折法.....张香春 宋耀祖(1079)
- 043288 R-141b 池沸腾气泡行为的可视化及传热研究.....刁彦华 赵耀华(1083)
- 043320 周期热流法测定金属及合金导热系数研究.....  
.....周子民 薛正华 Magne Lamvik(1087)

## 十. 工业应用、换热器及其它

- 043006 环路热管工作不稳定性的实验分析···张红星 林贵平 丁 汀 邵兴国(1092)
- 043009 泡沫铝翅片传热和流动特性的实验研究·····邱海平 施明恒(1099)
- 043015 微型燃气轮机回热器型面的选择计算·····朱博一 刘宝兴(1103)
- 043016 多股流换热器的控制优化·····关 欣 张 勤 崔国民 李美玲(1107)
- 043019 屏蔽气体对氩等离子体冲击射流的影响·····  
·····程 凯 陈 熙 潘文霞 王海兴(1111)
- 043025 基于低熔点金属及其合金的计算机芯片散热方法·····  
·····李 腾 吕永钢 刘 静 周一欣(1115)
- 043029 导热与弹性系统及导电的相似性·····韩光泽 朱宏晔 程新广 过增元(1119)
- 043032 析晶与颗粒混合污垢的实验研究·····徐志明 张仲彬 孙灵芳 杨善让(1123)
- 043034 直流纯氩层流等离子体射流的长度变化·····潘文霞 孟 显 吴承康(1127)
- 043035 层/湍流等离子体射流波动特性实验研究·····孟 显 潘文霞 吴承康(1131)
- 043039 错排环布圆管翅片式换热板芯的实验研究·····于永兴 王良璧(1135)
- 043041 CaO 孔隙形成与钙化转化的实验研究·····贾 力 刘立平(1139)
- 043042 下落液滴吸收  $\text{SO}_2$  的研究·····曾艳艳 贾 力(1143)
- 043043 蓄热换热与有害气体分解的实验研究·····贾 力 李建树(1147)
- 043044 固体火箭发动机低空羽流场的相似研究·····王雁鸣 谈和平 余其铮(1151)
- 043047 涡流管内热量传递过程分析·····周少伟 姜任秋 蔡 洁 王朋涛(1156)
- 043049 增压锅炉热力计算方法及热力性能参数变化研究·····  
·····李彦军 姜任秋 孙宝芝(1160)
- 043051 新型分形树状微通道散热器的实验研究·····陈永平 郑 平(1164)
- 043056 磁流体粘度的实验研究·····李 强 宣益民 王 健(1168)
- 043068 花岗岩表面双向反射分布函数实验研究·····  
·····谢 鸣 徐 辉 邹 勇 阮立明 谈和平(1172)
- 043086 膜反转板式降膜吸收过程的理论研究·····崔晓钰 李美玲(1177)
- 043088 飞船返回舱烧蚀防热不确定性初步研究·····  
·····王安龄 桂业伟 耿湘人 贺立新(1182)
- 043092 换热器动态特性状态方程模型研究·····陈 玮 余 敏(1188)
- 043093 半导体冰箱冷热端散热条件实验研究·····代彦军 戴维涵 王如竹(1194)
- 043097 板翅式换热器的设计研究·····胡忠霞 崔晓钰 崔国民 关 欣(1198)
- 043099 质子交换膜燃料电池低化学计量比下的性能研究·····  
·····刘 璿 郭 航 马重芳(1202)
- 043101 温度对直接甲醇燃料电池动态性能的影响·····汪茂海 郭 航 马重芳(1206)
- 043104 旋转射流冲击换热中流束旋度影响的实验研究·····  
·····胡云芝 苑中显 马重芳(1210)
- 043108 小型热泵的仿真与实验研究·····张 峰 俞 坚 唐志伟 马重芳(1215)

- 043111 水平光管外壁面液膜形成机理及传热特性研究.....  
.....梁泽德 梅 宁 武雅洁 陆虹涛 尹 凤(1220)
- 043112 热平衡判据应用研究.....付仕明 郗殿福 刘 锋 李劲东(1227)
- 043115 有机废气处理生物膜滴滤塔操作方式研究.....  
.....田 鑫 廖 强 朱 恂 李雷霆(1231)
- 043118 电量热器的优化设计.....  
.....余 敏 王 帅 杨 茉 卢 玫 章立新 徐 芳(1236)
- 043121 多种材料热结构的热应力计算研究...耿湘人 桂业伟 徐庆新 黄 谦(1241)
- 043122 微燃机回热器结构参数对其性能影响分析.....  
.....张 勤 崔国民 关 欣 王 静(1246)
- 043137 管状光催化反应器 VOCs 降解性能强化研究...莫金汉 杨 瑞 张寅平(1250)
- 043146 氯酸盐燃料加热与微波加热产氧的热分析.....  
.....韩 旭 茅靳丰 程宝义 王怀宇(1254)
- 043155 低温常压换热器性能数值模拟及实验验证.....  
.....韩蕴蕾 胡艳泳 王 松 曲永磊 孙 涛 石宝龙(1259)
- 043161 吸附制冷用吸附单元管设计和传热传质性能研究.....  
.....王德昌 吴静怡 夏再忠(1264)
- 043163 基于 ANSYS 热分析的高炉冷却壁冷却水管优化研究.....  
.....吴俐俊 程惠尔 苏允隆 王 杰(1268)
- 043165 风冷冷凝器速度场的实验研究.....刘金平 陈 军 文 娟 张宏亮(1273)
- 043166 铜管内表面冷却水污垢热阻的试验研究.....  
.....刘金平 魏瑞军 刘雪峰 杜艳国(1277)
- 043168 基于变风量调节的广州地铁采用相对热指标运行模式分析.....  
.....刘雪峰 刘金平(1281)
- 043175 换热器精确数学控制实验研究.....崔国民 马 晋 杜娟丽 张 勤(1286)
- 043176 温差均匀性优化原则在多股流换热器通道排列上的应用.....  
.....崔国民 赵永芹 卢洪波 张 勤 杜娟丽(1292)
- 043177 兼顾变工况性能的换热器柔性设计研究.....崔国民 卢洪波 李美玲(1297)
- 043178 换热器的柔性特性及柔性空间分析.....崔国民 卢洪波 李美玲(1301)
- 043185 一种热虹吸管散热器的研究.....罗清海 汤广法 龚光彩(1306)
- 043187 HCFC141b 气体水合物快速生成实验研究.....  
.....李金平 郭开华 梁德青 王如竹 樊栓狮(1313)
- 043196 太阳能烟囱电站中传热流动的数值模拟.....  
.....刘 伟 明廷臻 杨 昆 许国良(1318)
- 043201 加热带双面涂黑漆对真空试验中低温实现的作用.....杨晓宁 龚 洁(1322)
- 043202 疏水表面结霜特性的实验研究.....  
.....张新华 王洪燕 刘中良 孟 声 马重芳(1328)
- 043204 缩放管污垢性能的实验研究.....王建国 徐志明 周立群 杨善让(1332)

|                                      |                             |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| 043206 采用激光脉冲法测量绝热材料的热扩散率·····       | 魏高升 张欣欣 于帆 陈奎(1337)         |
| 043215 槽间距对矩形槽通道流动与换热的影响·····        | 李凌 杨荣 余敏 卢玫(1342)           |
| 043216 新型调湿材料的调湿特性试验研究·····          | 郑晓红 代彦军 王如竹(1346)           |
| 043220 波纹管内层流流动和换热规律的实验研究及数值模拟·····  | 曾敏 石磊 陶文铨(1350)             |
| 043226 多层墙体室内挥发性有机物扩散研究·····         | 张立志(1354)                   |
| 043227 基于膜的全热交换器传热传湿研究·····          | 张立志 徐学利 张明瑞(1358)           |
| 043228 歧管式微通道冷却热沉的三维数值优化·····        | 夏国栋 刘青 王敏 马晓雁 刘启明 马重芳(1362) |
| 043229 空气冷凝换热器模拟中几个问题的研究·····        | 徐向华 梁新刚 任建勋(1366)           |
| 043234 换热器性能研究中数据整理方法对所得换热系数的影响····· | 许伟 闵敬春(1370)                |
| 043238 探月基地热泵—恒温层蓄热组合排热探讨·····       | 王爱华 梁新刚 任建勋(1374)           |
| 043239 仿生优化在导热弱化中的应用·····            | 王爱华 梁新刚 任建勋(1378)           |
| 043241 半透明炭化硅薄膜的红外吸收特性·····          | 韩茂华 梁新刚(1382)               |
| 043245 场协同原理强化竖管外降膜吸收特性的实验研究·····    | 薄守石 马学虎 陈嘉宾 白涛(1386)        |
| 043254 导热优化中的最小势容耗散与最小熵产·····        | 程新广 孟继安 过增元(1390)           |
| 043257 利用空调冷凝热的膜蒸馏系统性能分析·····        | 陈群 张暘 任建勋(1394)             |
| 043263 用于建筑风道的光催化空气净化研究·····         | 鹿院卫 常梦媛 马重芳 王伟(1398)        |
| 043266 交变电磁抗垢强化传热机理的实验研究·····        | 陈永昌 常宝英 马重芳 邢晓凯 王湛 王炎(1402) |
| 043278 多效蒸发海水淡化系统的启动模型·····          | 杜小泽 吴少融 杨立军 刘登瀛(1406)       |
| 043280 传导式热流计测头标定系统的研制·····          | 李超 肖劲松 马重芳(1411)            |
| 043281 整流器对涡流管能量分离性能影响的研究·····       | 何曙 姜曙 吴玉庭 马重芳 葛满初 郭建(1415)  |
| 043284 热管喷射式制冷系统吸液芯的选择·····          | 蔡辉 施明恒(1419)                |
| 043296 航天器舷窗区域的热控设计和理论简析·····        | 张加迅 杨素君(1423)               |
| 043298 百叶窗式翅片换热器中的耦合传热·····          | 漆波 李隆键 崔文智 陈清华(1427)        |
| 043301 封闭空间内热管换热器设计与模拟研究·····        | 孙世梅(1432)                   |
| 043303 超临界压力下水在垂直加热管内传热特性实验研究·····   | 徐峰 郭烈锦 毛宇飞 江先恩(1438)        |
| 043305 换热器强化的温差优化判据·····             | 王松平 陈清林 尹清华 华贲(1447)        |
| 043306 重力辅助低温回路热管的实验研究·····          | 莫青 梁惊涛 蔡京辉(1452)            |

# 流动与传热对 NO<sub>x</sub> 吸收催化剂性能的影响

谢捷鸿 彭晓峰

相变与界面传递现象实验室, 清华大学热能工程系, 北京 100084

Tel: 010-62799752 E-mail: xiejiehong00@mails.tsinghua.edu.cn,

pxf-dte@mail.tsinghua.edu.cn

**摘要**—本文通过数值计算的方法了解 NO<sub>x</sub> 气体在催化剂中的流动传热和反应传质情况, 分析其中的影响因素, 认识内部现象和规律。

**关键词:** 流动, 传热传质, NO<sub>x</sub>, 催化剂

## 一、引言

氮氧化物(NO<sub>x</sub>)是污染大气的主要有害物质之一, 包括 NO、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 等。NO<sub>x</sub> 排放中, 90%产生于各种煤、石化燃料燃烧过程, 燃烧排出的主要是 NO 和 NO<sub>2</sub>, NO 占 90% 左右。氮氧化物不仅是酸雨形成的主要原因, 还可与碳氢化物等反应形成光化学烟雾, 危害人类健康。NO<sub>x</sub> (尤其是 NO) 是最难脱除的污染物, 成为环保化学中关键性难题。世界各国已广泛开展氮氧化物减排研究, 其中以选择性催化还原(Selective Catalytic Reduction, 或 SCR) 技术最为成熟, 在欧、美、日等发达国家燃煤电厂中广泛应用。

SCR 技术以 NH<sub>3</sub> 为还原剂, 在 250~500℃、O<sub>2</sub> 存在条件下选择催化还原 NO 生成 N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O, 达到脱除 NO 的目的。SCR 对 NO<sub>x</sub> 的脱除效率达到 90% 以上, 并且操作温度低。SCR 的研究除了在原有基础上进一步深入以外, NO<sub>x</sub> 气体在催化剂中的流动传热、反应传质对催化剂体系及 NO<sub>x</sub> 脱除效率的影响越来越收到关注, 涉及内部催化, 传质、传热现象, 关系到催化剂的使用效率等一系列问题。由于实验中难以测量内部参数, 了解内部分布, 只能得到催化剂进口和出口的数值, 本文用数值的方法模拟 NO<sub>x</sub> 气体在催化剂内部的流动与反应传热传质情况, 了解内部过程和现象, 认识规律, 为催化剂设计、流道优化以及反应强化提供依据。

## 二、数值模型

图 1 为 KOCAT 公司的催化剂, 选一单元为研究对象(图 2), 建立物理数学模型, 包括质量、动量、能量和传质等控制方程, 以及相关的化学反应方程, 限于篇幅不一列出。

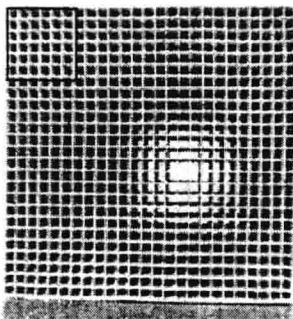


图 1 V205 催化剂实物图

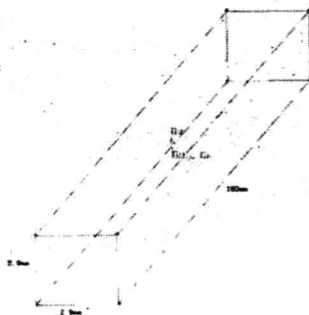
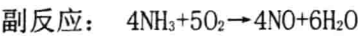
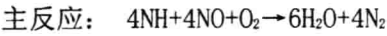


图 2 简化数学模型示意图

进入催化剂混合气体各组分气体物性和热力学参数如表 1 所列，流量 1000ml/s, 折算速度 0.04m/s。进口气体质量分数，N<sub>2</sub>：83.14%，O<sub>2</sub>：16.79%，NH<sub>3</sub>、NO 约 500ppm。模型考虑的反应主要有两个：

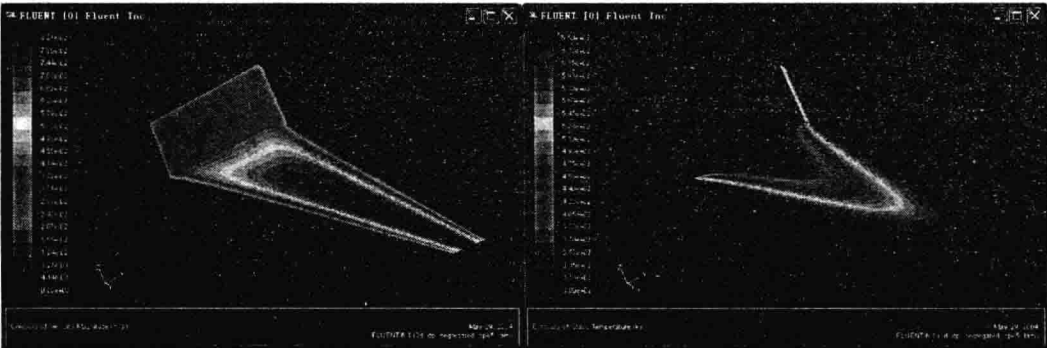


主反应脱除 NO，副反应生成 NO，整体反应是两个反应竞争的结果。数值计算采用图 2 半模型划分网格，选用 FLUENT6.1 的非耦合求解器作为计算工具。由于篇幅所限，具体方法和过程略

表 1 组成气体的物性和热力学参数

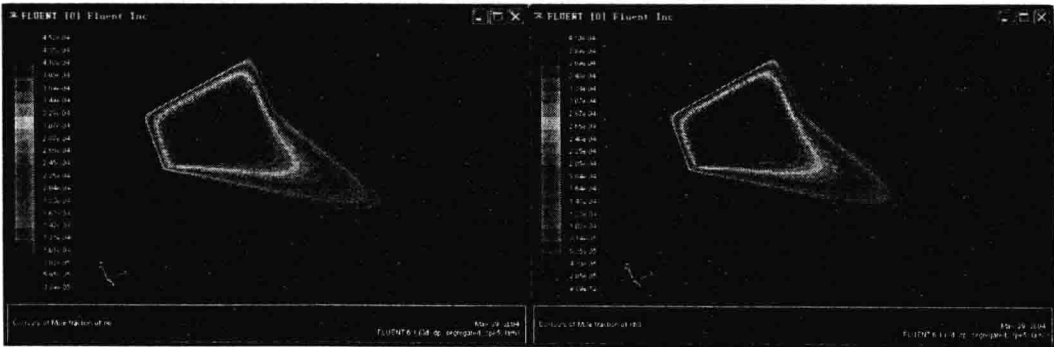
| 气<br>体           | 密度<br>kg/m <sup>3</sup> | C <sub>p</sub><br>J/kg·k | 导热<br>W/m·k | 粘度<br>kg/m·s | 摩尔质<br>量<br>kg/kmol | 参考温<br>度<br>K | 初始焓<br>J/kmol | 初始熵<br>J/kmol<br>-K |
|------------------|-------------------------|--------------------------|-------------|--------------|---------------------|---------------|---------------|---------------------|
| O <sub>2</sub>   | 1.30                    | 919.31                   | 0.0246      | 1.9e-5       | 30                  | 298.15        | 0             | 2.05e5              |
| N <sub>2</sub>   | 1.14                    | 1040.6                   | 0.0242      | 1.7e-5       | 28                  | 298.15        | 0             | 1.91e5              |
| H <sub>2</sub> O | 0.55                    | 2014                     | 0.0261      | 1.3e-5       | 18                  | 298.15        | -2.4e8        | 1.89e5              |
| NO               | 1.34                    | 986.46                   | 0.0235      | 1.8e-5       | 30                  | 298.15        | 9.1e7         | 2.11e5              |
| NH <sub>3</sub>  | 0.69                    | 2158                     | 0.0247      | 1.0e-5       | 17                  | 298.15        | -4.6e7        | 1.92e5              |

三、数值结果及分析



(a) 速度分布

(b) 温度分布



(c) NO 摩尔浓度分布

(d) NH<sub>3</sub> 摩尔浓度分布

图 3 催化剂通道内各物理参数变化

图 3 示出了单元催化剂通道内的三维数值结果, 进出口参数与所对应的实际运行实验结果非常吻合, 不再赘述。下文着重分析反应单元内部的现象和过程规律, 为突出现象, 简化分析, 进行二维分析。

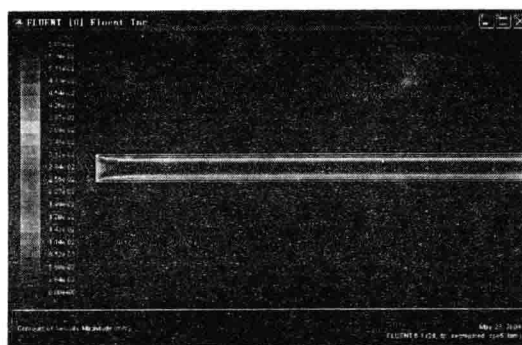


图 4 二维速度分布

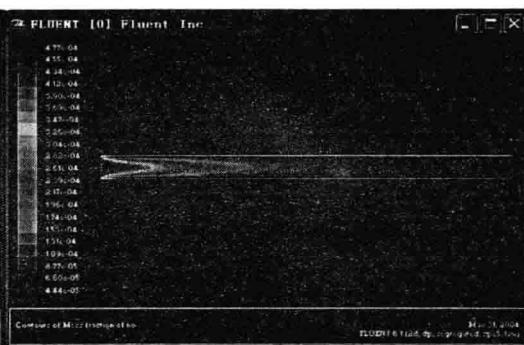


图 5 NO 质量分数分布

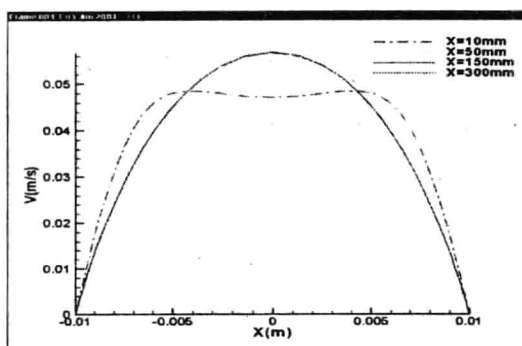


图 6 不同横截面速度分布

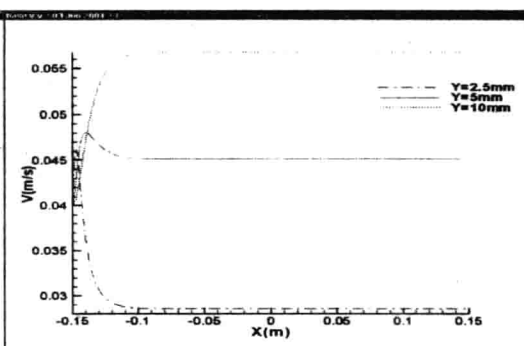


图 7 不同纵截面速度分布

从图 5—7 可以看到, 进口 10mm 处速度对称出现峰值, 是加热使近壁面流体膨胀加速, 随后流体膨胀加速作用被粘性作用所抑制, 速度逐步向正常的抛物线分布变化, 在进口 50mm 时速度基本上达到稳定, 完全符合无滑移边界条件的速度分布。图 7 中不同横向位置随纵向距离的速度变化很好的描绘了这种效应的影响程度和区域, 反映出低速流动时加热过程流体膨胀效应不可忽视。

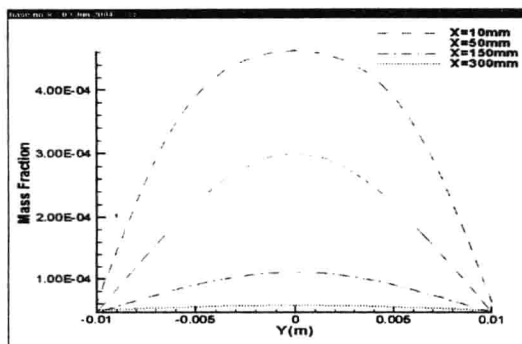


图 9 不同横截面 NO 浓度分布

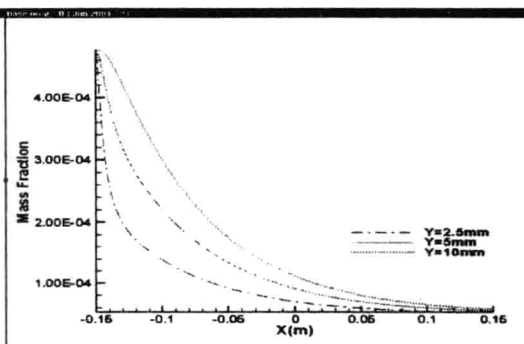


图 10 不同纵截面 NO 浓度分布

图 8—10 的结果表明, NO 在中线处浓度比壁面高得多, 说明在催化剂结构中 NOx 吸收过程是扩散控制的化学反应。显然, NO 在催化剂通道横截面的均匀分布有利于反应

的进行, 提高 NO 的脱除效率。

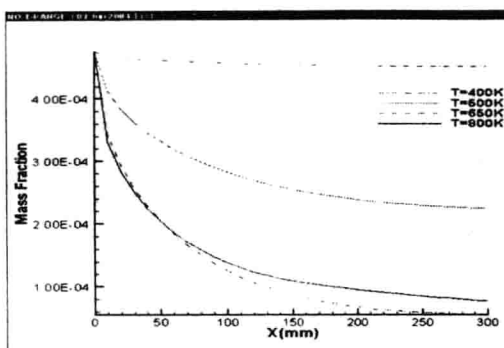


图 11 不同壁温下 NO 横截面平均质量分数  
沿程分布

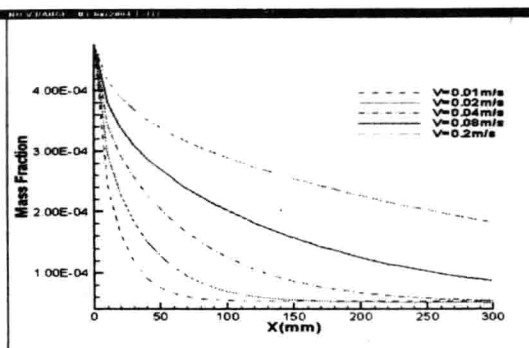


图 12 不同进口速度 NO 横截面平均质量分数  
沿程分布

图 11 示出不同壁温时 NO 平均质量分数沿程变化。壁面 400K 时, 横截面 NO 平均质量分数沿轴线没有太大的变化。随着温度的升高, NO 横截面平均质量分数减小。壁温为 650K 时, NO 出口截面平均质量分数仅为进口的 10% 左右。可是, 温度的进一步升高, NO 出口截面平均质量分数再次升高, 这与人实验结果相符。分析认为, 由于副反应会生成 NO, 而且反应速率与温度的幂次方成正比, 所以随着壁温的进一步升高, 副反应加大而使 NO 质量分数再次升高。

图 12,  $v=0.01\text{m/s}$  时, 进口 100mm 处 NO 横截面平均质量分数降至进口的 10% 左右; 而  $v=0.2\text{m/s}$  时, 进口 100mm 处 NO 横截面平均质量分数仍为进口浓度的 90%。说明进口速度的增加, 出口 NO 的质量分数相应增加; 一方面速度增大, NO 总量加大, 另一方面含 NO 混合气在同样的通道中停留时间缩短, 吸收不充分。虽然增大速度有利于在壁面附近保持较高的 NO、NH<sub>3</sub> 浓度, 可是现比上述两方面不利影响, 认为增大速度对 NO 的脱除是不利的。

### 三、结论

催化剂中脱除 NO 的反应是一个由扩散控制的化学反应, NO 在催化剂通道横截面的均匀分布有利于反应的进行, 提高 NO 的脱除效率。温度对脱除反应的影响存在有一个极值, 一般控制在 300~350 摄氏度为佳。进口速度越低, 越有利于 NO 的脱除, 在同等级脱除要求下应尽可能缩短催化剂长度, 减少尺寸, 节约材料。

### 参考文献

1. Pio Forzatti. Present status and perspectives in de-NO<sub>x</sub> SCR catalysis, Applied Catalysis A: General 222 (2001) 221-236
2. 韩国 KOCAT 公司 NH<sub>3</sub>-SCR 系统简介
3. 陶文铨 《数值传热学》

# 错排环布圆管翅片式换热板芯 的计算研究

樊菊芳 于永兴 王良璧

(兰州交通大学机电工程学院, 兰州 730070)

联系电话: 0931-4956556 E-mail: lbwang@mail.lzjtu.cn

**摘要** 本文运用数值模拟的方法对错排环布圆管翅片式换热板芯进行了研究, 对几种结构的速度场、温度场、局部 Nu 数分布、横向平均 Nu 数分布在  $300 < Re < 4800$  的范围内进行比较分析。为该结构与直排圆管翅片式换热板芯作比较提供了理论依据, 对此结构的进一步研究奠定基础。

**关键词** 换热板芯; 数值模拟; 同位网格; 有限差分

## 1. 引言

目前对换热器板芯的研究主要是针对直排式进行的, 对环形布置换热板芯的研究未见报道, 而这种结构在实际工程中已被采用, 如电力机车变压器油散热器。为了对这种结构进行更深入的研究, 本文对错排环布圆管翅片式换热板芯进行了模拟分析。

## 2. 换热器的数学物理模型

### 2.1 物理模型及控制方程

本文计算对象为: 翅片间距  $T_p = 2.5 \text{ mm}$ 、管数  $N_{\text{tube}} = 60$ 、管排数  $N_{\text{row}} = 3, 4, 5$  的错排环布圆管翅片式换热板芯, 其物理模型平面图如图 1 所示。对于  $N_{\text{row}} = 4$  的物理模型其三维立体图如图 2 所示。为了计算的方便, 从图 1 中截取  $\theta = 6^\circ$  的一部分作为计算用的物理模型, 如图 3(a) 所示。考虑到结构的对称性及流动的特点, 从图 3(a) 中截取一半作为本文数值模拟的计算区域, 如图 3(b) 所示。

为了便于分析, 我们假定: (1) 流体是常物性的; (2) 流动和换热处于稳态层流非周期性的初始段; (3) 体积力和耗散项可忽略。

以下以张量的形式给出流动与换热的控制方程:

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

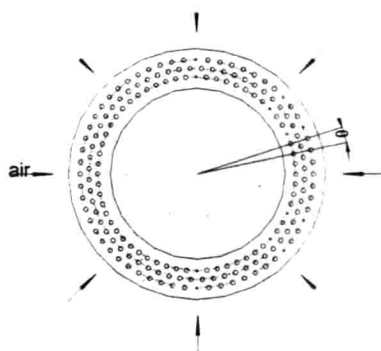


图 1 错排环布圆管翅片式换热板芯的物理模型

$$\text{运动方程: } \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i}) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (k=1, 2, 3).$$

$$\text{能量方程: } \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}).$$

图 4 为使用无限插值法生成的网格示意图。通过复杂的数学变换将直角坐标中的控制方程变换成适体坐标下的控制方程, 表达式为[1]:

$$\frac{\partial}{\partial(\xi)}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho V) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(\rho W) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi}(\rho U \phi) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho V \phi) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(\rho W \phi) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \frac{\alpha}{J} \tau^* \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ \frac{\beta}{J} \tau^* \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[ \frac{\gamma}{J} \tau^* \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right] + JS_s$$

## 2.2 边界条件

入口边界条件为:

$$u_f = u_{f,in}, T = T_{in};$$

出口边界条件为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0;$$

固体壁面边界条件为:

$$u = v = w = 0, T_w = \text{const}$$

对称面边界条件为:

$$\frac{\partial u_f}{\partial n} = 0, \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0, v_q = 0$$

## 3. 数值求解

将适体坐标系中的控制方程, 在控制容积上积分, 导出计算域面上三维通用的微分方程离散形式[2]。计算采用基于同位网格系统的 SIMPLE 算法[2], 并采用 Rhie-Chow[3]的方法计算界面上逆变速度。经过网格考核, 加密或稀疏网格对数值计算结果影响很小, 因此所得的数值解是网格独立的解。

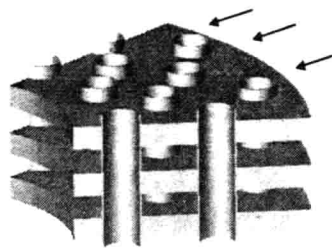


图 2: 错排环管翅片式  
换热板芯示意图

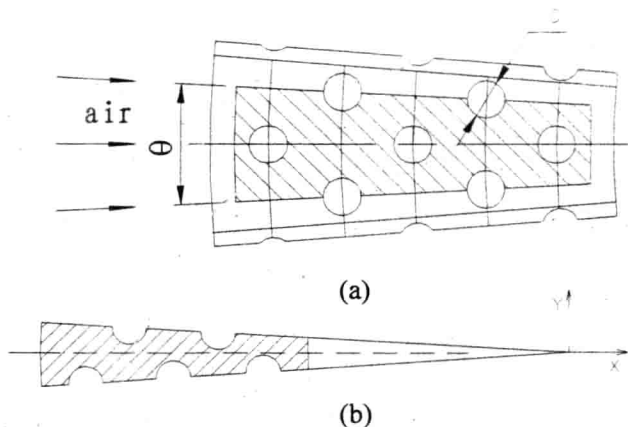


图 3: 计算区域示意图

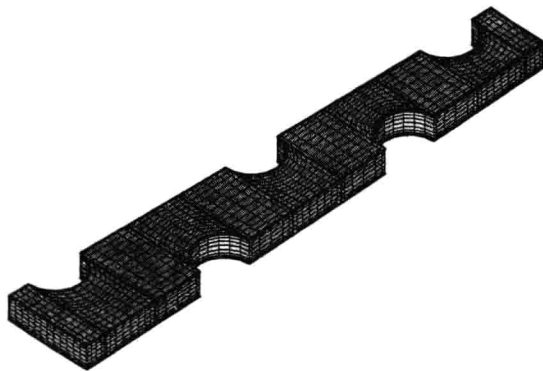


图 4 计算网格示意图

# 4. 结果及分析

## 4.1 翅片局部换热特性分析

图 5 为  $T_p=2.5\text{mm}$ 、 $N_{row}=4$ 、 $N_{tube}=60$  时, 不同  $Re$  数下翅片局部换热系数的分布。由图可知: 在圆管前驻点位置, 翅片局部换热系数 ( $Nu$  数) 很高, 这是因为在该位置上, 边界层开始形成, 因此能够大幅度的强化换热, 随着流体沿圆柱周向迁移, 边界层逐渐增厚, 局部换热系数随之减小; 从图中我们还可以看出: 贴近圆管前部的翅片表面局部换热系数比较高, 沿着流动方向越来越小, 并在圆管尾部的翅片表面出现一个非常明显的低换热区。

## 4.2 翅片横向平均 $Nu$ 数随 $Re$ 数的变化

图 6 为  $T_p=2.5\text{mm}$ 、 $N_{row}=4$ 、 $N_{tube}=60$  的换热板芯在不同  $Re$  数下翅片横向平均换热系数 ( $Nu$  数) 沿流动方向的变化。从图中我们可以看出: 在任一  $Re$  数下, 流体绕流每排圆管时, 翅片横向平均换热系数都会出现一个峰值, 入口处翅片平均换热系数最高, 后面三排圆管翅片平均换热系数的峰值在  $Re$  数较低时差别不大, 随着  $Re$  数的增加, 三处峰值都有不同程度的增加, 但第二排和第四排增长幅度最大, 且第二排更高一些, 第三排增长幅度则比较小, 其具体原因尚不明确。

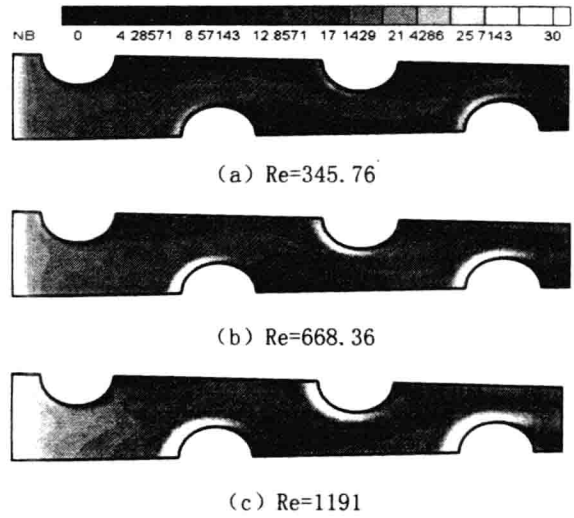


图 5 不同  $Re$  数下的局部  $Nu$  数分布图

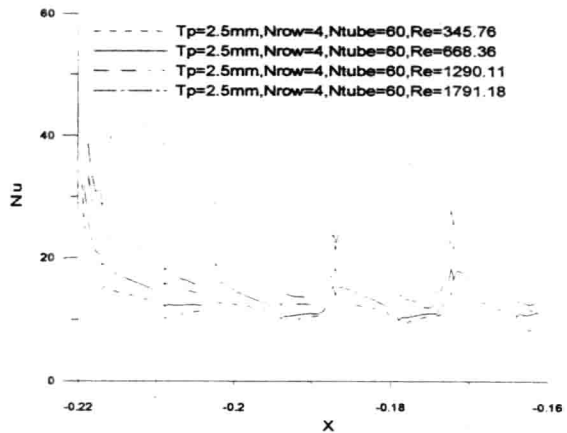


图 6 横向平均  $Nu$  数沿流动方向的变化

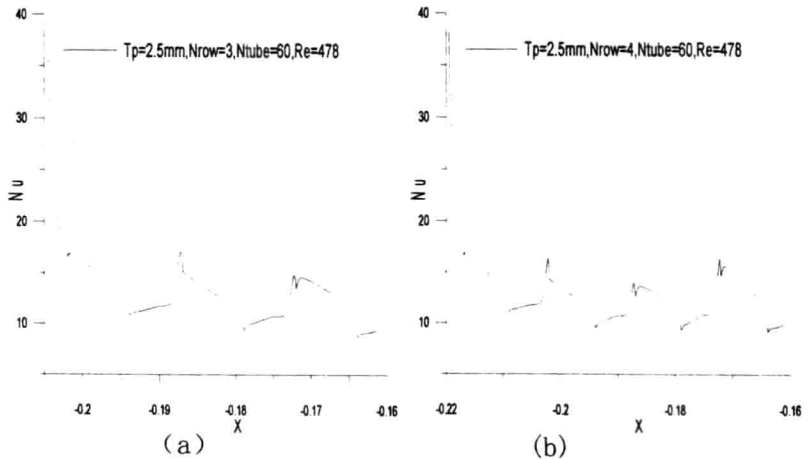


图 7 不同排数在同一  $Re$  数时的横向平均  $Nu$  数的比较

### 4.3 不同管排数在同一 Re 数下翅片横向平均 Nu 数的比较

图 7 给出了  $T_p=2.5\text{mm}$ 、 $N_{row}=3, 4, 5$ 、 $N_{tube}=60$  的换热板芯在  $Re=927$  时, 翅片横向平均 Nu 数的比较, 从图中可以看出: 对于 3 排管, 随着管排数的增加, 从第二排起, 翅片平均 Nu 数有明显下降, 且后一排比前一排更低, 这一点与实验结果一致; 对于 4 排管, 第 4 排管的翅片平均换热系数峰值高于第 3 排管, 这可能是由于流道缩小, 流速增加所致, 也可能是由于计算时给出的出口边界条件和实际情况有所差异造成的。

## 5. 结论

本文对  $T_p=2.5\text{mm}$ 、 $N_{row}=3, 4, 5$ 、 $N_{tube}=60$  三种结构的错排环布圆管翅片式换热板芯表面换热特性进行模拟研究, 通过分析可以得出: 在圆管前驻点位置翅片局部 Nu 数很高, 随流体绕圆柱周向迁移, 靠近圆柱翅片局部 Nu 数有规律下降, 并在圆管尾部的翅片表面出现一低换热区; 在任一 Re 数下, 流体绕流每排圆管时, 翅片的横向平均换热系数都会出现一个峰值, 入口处翅片平均换热系数最高, 然后沿流动方向逐渐减小; 在同一位置随 Re 数的增加翅片横向平均换热系数也增加, 且随着管排数的不同, 增加的程度也有所不同; 对于 4 排管所出现的第四排管翅片平均换热系数峰值高于第三排管的原因, 可能是出口边界的处理上与实际情况有所差异所致, 但具体原因仍有待于进一步的考证。

### 符号说明

|                         |          |                    |         |
|-------------------------|----------|--------------------|---------|
| $c_p$                   | 定压比热     | $D$                | 定型尺寸    |
| $J$                     | 雅可比因子    | $S$                | 广义源项    |
| $T$                     | 温度       | $u, v, w$          | 直角坐标下速度 |
| $U, V, W$               | 逆变速度     | $x, y, z$          | 直角坐标    |
| $\alpha, \beta, \gamma$ | 坐标变换引入参数 | $\zeta, \eta, \xi$ | 适体坐标    |
| $\lambda$               | 导热系数     | $\mu$              | 动力粘度    |
| $\rho$                  | 空气密度     | $\phi$             | 通用变量    |
| $\tau$                  | 广义扩散系数   |                    |         |
| 下标:                     |          |                    |         |
| $f$                     | 法线方向参数   | $q$                | 切线方向参数  |
| $in$                    | 入口参数     | $w$                | 壁面参数    |
| $\phi$                  | 通用变量     |                    |         |
| 上标:                     |          |                    |         |
| $\phi$                  | 通用变量     |                    |         |

### 参考文献:

- [1] 王良壁. 复杂截面通道的紊流流动与传热特性的实验及数值计算. 博士学位论文. 西安交通大学, 1996
- [2] 陶文铨. 《数值传热学》. 第 2 版. 西安交通大学出版社, 2001
- [3] Rhie C M, Chow W L. A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation. AIAA J, 1983. 1525-1552

# 涡强化扁管管片散热器流动与传热的数值模拟

孙东亮 王良璧

(兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

联系电话: 0931-4956556 E-mail: [lbwang@mail.lzjtu.cn](mailto:lbwang@mail.lzjtu.cn)

**摘要:** 本文以空气为介质( $Pr=0.698$ ), 通过数值模拟的方法在  $Re=300-1800$  的范围内对涡强化扁管管片散热器初始段层流状态下的流动与传热进行了模拟分析, 说明了涡产生器横向位置, 即交错系数  $Sr$  改变时对局部  $Nu_{Local}$  和横断面上的平均  $Nu_b$  的影响, 并通过实验数据验证了数值模拟方法的正确性, 证实了通过数值模拟的方法研究、开发换热芯片的可行性。

**关键词:** 数值模拟、涡产生器、强化传热、涡强化扁管管片散热器、换热芯片

## 1. 前言

由于涡产生器所产生的涡使冷热流体相互掺混, 增加流体流动的紊流度等机理来强化传热, 加在主流上的纵向涡能够以比较小的阻力损失来增强换热, 其主要原因是壁面上的阻力损失主要取决于主流在壁面法向方向的梯度而不取决于二次流的梯度; 由于涡强化传热有比较小的阻力损失, 所以现已把这一方法归结为第三代强化传热手段。鉴于上述理由, 涡强化传热越来越受到重视, 并且研究报道也愈来愈多。有关涡强化扁管管片散热器换热板芯的实验研究最近报道比较多<sup>[1-5]</sup>, 但有关涡强化扁管管片散热器流动与传热数值模拟的研究未见报道。通过实验开发换热板芯是一种比较通用的方法, 但如果通过实验开发换热板芯不但需要花费大量的人力、物力, 而且受实验仪器精度及外界环境变化影响比较大, 并且开发周期长。如果采用数值模拟的方法开发换热板芯, 将节省大量的人力、物力, 并且可以极大程度地缩短开发周期。除以上优点外, 还可以通过分析流场, 温度场, 局部努塞尔场来指导换热芯片的开发改进, 所以采用数值模拟的方法开发换热板芯具有重大的现实意义, 并且也是现在科技发展的必然。如何对涡强化扁管管片散热器如此复杂的区域进行数值模拟? 数值模拟的结果是否与实验数值相一致? 涡产生器横向位置, 即交错系数  $Sr$  改变时对局部  $Nu_{Local}$ 、横断面上的平均  $Nu_b$  产生什么影响? 本文就以上问题展开探讨。

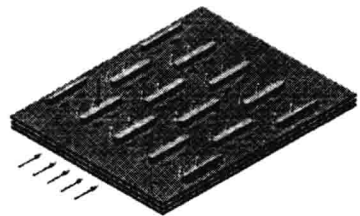


图1 涡强化扁管管片散热器示意图

## 2. 物理模型和数学方程

涡强化扁管管片散热器如图1所示。扁管管片散热器及涡产生器的几何尺寸如图2所示,  $S_1=40\text{mm}$ ,  $S_2=55\text{mm}$ ,  $a=6.3\text{mm}$ ,  $b=46.3\text{mm}$ , 板间距  $T_p=5\text{mm}$ , 涡产生器高度