

# 考虑蒸汽热力行为的凝汽器喉部流动模拟

张磊磊, 崔国民, 关欣, 高孝忠  
(上海理工大学热工程研究所, 上海 200093)

**摘 要:** 应用蒸汽凝结核心形成理论, 从描述蒸汽凝结核心形成的微观机理的角度出发, 分别对自发凝结核心的分布规律和形成率进行了分析, 建立了蒸汽分子凝结的概率模型。在此基础上, 应用直接模拟蒙特卡罗方法对汽轮机凝汽器喉部内蒸汽的热力行为进行了模拟计算, 研究凝汽器喉部内蒸汽湿度对流动阻力和流动均匀性的影响。计算结果表明: 考虑蒸汽热动力行为时, 可以降低蒸汽的流动阻力, 同时也使喉部内蒸汽的流场分布状况有了一定程度的改善。

**关键词:** 凝汽器喉部; 蒸汽热力行为; 凝结核心; 核心形成率理论; DSMC 模拟

中图分类号: TK264.1 文献标识码: A

## 引 言

在凝汽式汽轮机系统中, 具有较大初始过热度的高速蒸汽流在经过汽轮机逐级膨胀后, 过热度不断减小, 过饱和蒸汽开始逐渐凝结, 并在汽轮机低压部分进入两相区<sup>[1]</sup>。蒸汽的热力行为主要是指过饱和蒸汽在绝热膨胀过程中, 蒸汽分子自发碰撞、聚集凝结成液滴以及蒸汽分子与液滴发生碰撞而导致液滴破碎等一系列的热力过程。

蒸汽开始凝结及凝结成稳定水滴的特性直接由蒸汽过冷度决定的。当过冷度逐渐增大时, 蒸汽分子就以稳定的细小分子聚合体为凝结核心, 开始凝结过程。而凝结液滴在自身热运动过程中又将相互碰撞, 导致液滴的破碎。当蒸汽分子的凝结数量与液滴破碎产生的分子数相等时, 蒸汽又近似地恢复到热力学平衡状态<sup>[2-4]</sup>。

应用蒸汽凝结核心形成理论, 从描述蒸汽凝结核心形成的微观机理的角度出发, 建立蒸汽分子凝结的概率模型以及液滴破碎的概率模型, 并对凝汽器喉部内的蒸汽热力行为进行 DSMC 模拟, 以进一步研究汽轮机内汽-液两相流动的特性。

## 1 蒸汽凝结核心理论

蒸汽凝结的实质就是在一定的条件下, 蒸汽分子在凝结核心表面聚集而形成液滴的过程。在凝结过程中, 能够充当凝结核心的一般有蒸汽中包含的杂质粒子、自发凝结核心以及固体壁面。但是处于饱和状态或过饱和状态的蒸汽和固体壁面之间存在温度边界层, 减弱了蒸汽在固体壁面处的凝结效应<sup>[3]</sup>。而且在蒸汽动力循环中, 对水质的要求日益严格, 蒸汽中可供作为凝结核心的杂质粒子数目极少, 即可以认为凝汽器喉部内为纯蒸汽。因此在分析凝结过程时, 不考虑固体壁面处的凝结效应, 同时也不考虑杂质粒子对凝结过程的影响。另外, 由于蒸汽在喉部的膨胀不很严重, 并且流动时间极短, 蒸汽在汽轮机的排汽口及喉部的流动过程中, 水滴数目不发生变化, 并且水滴的直径也不再增加, 同时认为所有水滴中, 一次水滴和二次水滴比例分配不变。

### 1.1 自发凝结核心的分布率

处于未饱和状态或过饱和状态的蒸汽分子之间也会发生碰撞聚合形成小液滴, 这种小液滴称为自发凝结核心<sup>[3]</sup>。其分布规律由下列公式可得:

$$N_g = C \cdot e^{-\Delta\phi_g/kT} \quad (1)$$

式中:  $\Delta\phi_g$ —由  $g$  个分子组成的液滴的生成能,  $N_g$ —由  $g$  个分子组成的液滴的数目;  $k$ —玻耳兹曼常数;  $C$ —等于分子总数的常数。由  $g$  个分子组成的液滴, 其生成能等于  $g$  个分子在液体状态和蒸汽状态下的热力势之差:

$$\Delta\phi_g = g(\phi_l - \phi_g) + 4\pi r^2 \sigma \quad (2)$$

式中:  $\phi_l$ 、 $\phi_g$ —一个分子分别在液相和汽相下的热力势;  $r$ —液滴的半径;  $\sigma$ —液滴的表面张力。  $g$  和  $r$  之间的关系如下:

收稿日期: 2007-11-12; 修订日期: 2008-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(2046011); 上海市重大科技攻关基金资助项目(05412028); 上海市教育委员会发展基金资助项目(07ZZ85, 07ZZ89)

作者简介: 张磊磊(1984—), 男, 安徽亳州人, 上海理工大学硕士研究生

$$g = \frac{4\pi}{3V_1} r^3 \quad (3)$$

式中:  $V_1$ —一个液相分子体积。将式(3)代入式(2)得液滴的生成能为:

$$\Delta\phi_g = \frac{4\pi}{3V_1} (\phi_l - \phi_g) r^3 + 4\pi r^2 \sigma \quad (4)$$

式中由两部分组成, 前一部分为体积能量项, 后一部分为表面能量项。当蒸汽处于未饱和状态时, 液相分子的生成能比汽相的大, 两部分均为正值, 此时蒸汽流处于一种稳定状态。当蒸汽进入过饱和区后, 液相分子的生成能比汽相的要小, 因此生成能中的体积能量项为负值。这样生成能随着凝结核心半径的变化会出现极大值, 对应于式(1)存在极小值, 此时核心半径用  $r^*$  表示, 则:

$$r^* = \frac{2\sigma V_1}{(\phi_g - \phi_l) r^*} \quad (5)$$

定义此极小值点的半径为临界凝结核心半径。

### 1.2 自发凝结核心的形成率

按照蒸汽凝结理论, 所有长大的液滴都必须先达到临界半径, 然后再作为稳定的液滴核心继续增长。定义单位时间、单位体积内生成临界凝结核心的个数为核的形成率, 用  $J(g^*)$  来表示。其在数值上等于临界核心的数目、单位时间内碰撞到一个临界核心表面上的蒸汽分子数和一个临界核心所包含的蒸汽分子的数目三者的乘积<sup>[5]</sup>。

对于自发凝结核心的形成率, 采用伏尔末(Volmer)提出的公式。由于蒸汽在过饱和区内的凝结核心为不稳定分布, 因此在考虑凝结核心形成率时先作如下假设: (1) 认为未饱和状态下蒸汽的核心分布规律可以用来描述过饱和状态下的蒸汽。这样凝结核心数目的分布规律随半径的增大而增多, 而不会出现在核心半径超过临界尺寸后两者成反比的情况; (2) 为保持蒸汽的状态参数不变, 假定所有凝结核心长到临界尺寸以后就从蒸汽流中取出, 并代之以和临界核心中所包含的分子数相等的蒸汽分子<sup>[6]</sup>。在上述两点假设的基础上, 伏尔末公式可表示为:

$$J(g^*) = \frac{4\pi (r^*)^2 p^2}{(kT)^{3/2} \sqrt{2\pi m}} \exp\left[-\frac{4\pi\sigma (r^*)^2}{3kT}\right] \quad (6)$$

式中:  $p$ 、 $T$ —蒸汽的压力、温度;  $m$ —蒸汽分子的质量;  $k$ —玻耳兹曼常数。

### 1.3 蒸汽分子凝结的概率模型

下面应用伏尔末理论, 推导每个蒸汽粒子能够发生凝结的概率。设处于临界状态尺寸的液滴核所包含的分子数为  $g^*$ , 则单位时间、单位体积内凝结

的蒸汽分子数为:

$$n_1 = g^* \cdot \frac{4\pi (r^*)^2 p^2}{(kT)^{3/2} \sqrt{2\pi m}} \exp\left[-\frac{4\pi\sigma (r^*)^2}{3kT}\right] \quad (7)$$

则在单位时间步长  $\Delta t$ 、体积  $V$  内凝结的蒸汽分子数为:

$$n = n_1 \cdot \Delta t \cdot V \quad (8)$$

因此每个蒸汽分子凝结的概率为:

$$P_{nj} = \frac{n}{N} = \frac{n_1 \cdot \Delta t \cdot V}{N} = \frac{\Delta t \cdot V \cdot g^*}{N} \cdot \frac{4\pi (r^*)^2 p^2}{(kT)^{3/2} \sqrt{2\pi m}} \exp\left[-\frac{4\pi\sigma (r^*)^2}{3kT}\right] \quad (9)$$

液滴的表面张力随液滴的半径变化而变化, 陶尔曼(Tolman)应用准热力学观点提出了一个表面张力依赖于液滴半径的关系式<sup>[7]</sup>:

$$\sigma(r) = \sigma_\infty \cdot \frac{1}{1 + (2/\delta)r} \quad (10)$$

式中:  $\delta$ —等于液滴分子半径 0.25~0.6 倍的常数;  $\sigma_\infty$ —平面状液面的表面张力,  $10^{-3} \text{N/m}^2$ , 其计算可采用下列经验式:

$$\sigma_\infty = \frac{\alpha_1 (T_k - T)^2}{1 + \beta (T_k - T)} + \sum_{n=2}^5 \alpha_n (T_k - T)^n \quad (11)$$

式中:  $T_k$ —水蒸气的临界温度, 647.31 K;  $T$ —蒸汽的温度;  $\alpha_1 = 1.16093681 \times 10^{-1}$ ;  $\alpha_2 = 1.12140469 \times 10^{-3}$ ;  $\alpha_3 = -5.752805180 \times 10^{-6}$ ;  $\alpha_4 = 1.286274650 \times 10^{-8}$ ;  $\alpha_5 = -1.149719290 \times 10^{-11}$ ;  $\beta = 0.83$ 。

### 1.4 液滴粒子破碎的概率模型

汽液两相流中引起液滴破碎的主要原因是液滴的气动力和颗粒的碰撞力的综合作用。其微观机理为液滴在气动力或与其它粒子碰撞的作用下, 破碎成蒸汽分子或更小的液滴粒子。本文假设液滴在碰撞时液滴凝结核心最终完全破碎成蒸汽分子。

目前关于液滴分子碰撞破碎概率问题尚完全不清楚, 基本上以经验公式为主, 且具有非常严格的适用条件<sup>[8~9]</sup>。而在本文的计算情况下, 由于蒸汽流速很大, 流过整个喉部的时间很短。因此, 认为整个区域的平均湿度基本不发生变化, 则液滴分子的破碎概率就等于整个区域的平均凝结概率与液滴所含分子数之比:

$$P_{ps} = P_{nj} / g \quad (12)$$

但是对于喉部内不同区域, 由于压力场的分布极不均匀, 造成各区域的凝结概率不同, 因此各区域的湿度分布并不相同。

## 2 喉部内蒸汽热力行为的 DSMC 模拟

应用直接模拟蒙特卡罗方法, 针对某 600 MW 机组凝汽器喉部内考虑蒸汽热力行为的流动特性进行了模拟计算, 计算条件如表 1 所示, 得出了蒸汽的流动阻力和流场分布, 具体的模拟步骤和其它概率模型见文献[ 3, 10]。在模拟计算过程中, 认为蒸汽的初始湿度为 6%, 每个凝结核心包含有 40 个蒸汽分子。

表 1 某 600 MW 机组凝汽器喉部参数

	数值
凝汽器入口尺寸/mm×mm	6700×7600
凝汽器高度/mm	4620
低压加热器高度/mm	2290
低压加热器直径/mm	1820
扩散角度/(°)	30
蒸汽入口速度/m·s <sup>-1</sup>	160
蒸汽入口压力/Pa	4900
蒸汽入口温度/K	290

### 2.1 喉部物理模型

凝汽器喉部是一个高度真空的容器, 通常被设计成具有一定扩散角度的棱台形。其内部布置有大量的支撑管、抽气管、低压加热器、减温减压装置等元件。由于大量的支撑管和抽气管的结构布置十分复杂, 为简化物理模型, 主要考虑壳体和低压加热器两个主要部分, 其物理模型如图 1 所示。

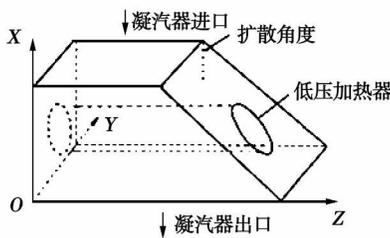


图 1 喉部物理模型(1/2 部分)

### 2.2 蒸汽凝结对喉部汽阻的影响

首先就蒸汽湿度对喉部阻力性能的影响进行了研究。图 2 表示喉部阻力随蒸汽湿度的变化关系, 从图中可以看出, 随着蒸汽湿度的增大, 喉部的压力损失反而减小。而当蒸汽湿度为零时, 喉部的压力损失最大, 即湿度的增大可以降低喉部的压力损失。其主要是当蒸汽湿度增大时, 蒸汽中液滴粒子的增

多, 使得喉部进口的蒸汽平均分子量增大。又因为:

$$\rho = \frac{P}{RT} \cdot M \quad c = \frac{m}{\rho \cdot A} \quad (13)$$

式中:  $M$ —湿蒸汽的平均分子量;  $A$ —喉部的入口截面积;  $m$ —汽轮机的排汽量;  $c$ —蒸汽入口速度。由式(13)可得: 蒸汽湿度越大, 蒸汽的平均密度增大, 入口的平均速度越低。因此使得出口平均速度也越低, 流动阻力越小。

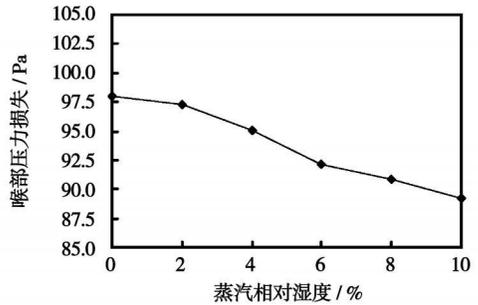


图 2 喉部压力损失随蒸汽湿度的变化关系

### 2.3 喉部压力与湿度分布

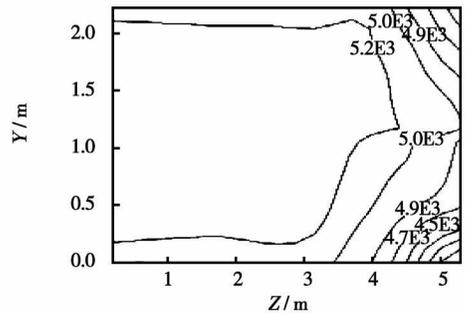


图 3 H=2.29 m 截面压力分布

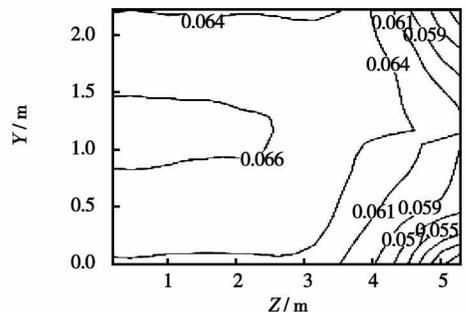


图 4 H=2.29 m 截面湿度分布

图 3~图 6 分别表示距出口 2.29 和 1.16 m 截面处的压力和湿度等值线图。如图 3 和图 4 所示, 由于在斜壁下方形成回流区, 使得斜壁区域的压力相对较低。由式(9)可知: 在对应区域内蒸汽的凝结概率相对较小, 液滴破碎的概率大于蒸汽的凝结

概率与液滴所含分子数之比。因此, 随着蒸汽凝结过程的进行, 该区域内的蒸汽湿度逐渐降低。如图 5 所示, 在  $H=1.16\text{ m}$  截面上, 由于低压加热器的存在, 使得来流绕圆柱流动产生了绕流脱体效应, 在低压加热器下方形成低压区, 因此该区域内蒸汽湿度也较低。

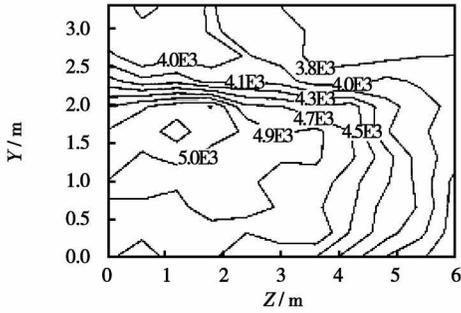


图 5  $H=1.16\text{ m}$  截面压力分布

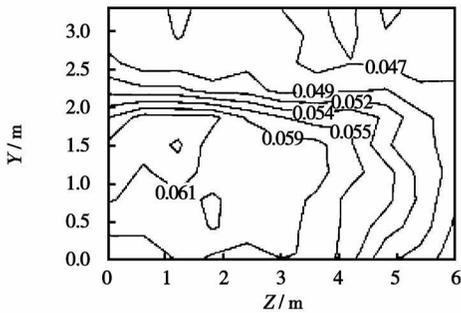


图 6  $H=1.16\text{ m}$  截面湿度分布

### 2.4 蒸汽凝结对喉部出口流场分布的影响

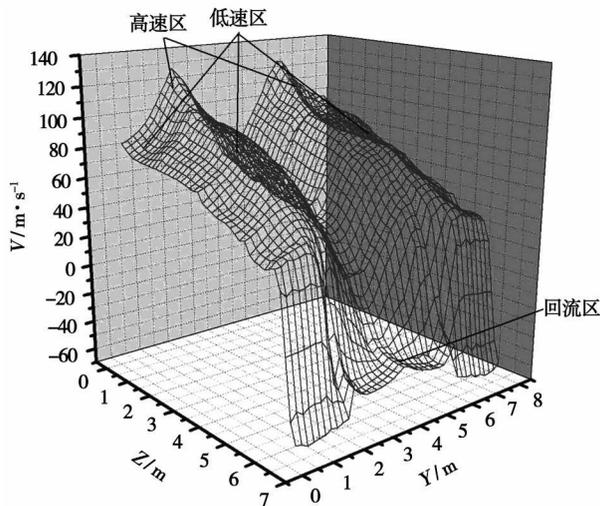


图 7 蒸汽湿度为 2% 时喉部出口流场分布

6% 两种情况下的出口流场分布图。如图所示, 两种情况下流场的分布基本相同: 均包括高速区、低速区和回流区。但是, 当相对湿度较大时, 高速流区的蒸汽流速与低速流区的蒸汽流速之差较小, 而回流区域较大; 当相对湿度较小时, 两者之差较大。即蒸汽湿度越大, 流场的分布越均匀。这主要是因为高速流区的蒸汽压力较高, 蒸汽分子的凝结概率较大, 因此随着湿度的增大, 速度越来越小; 而对于低速流区, 由于压力相对较低, 蒸汽湿度较小, 因此速度降低的幅度比高速流区小。

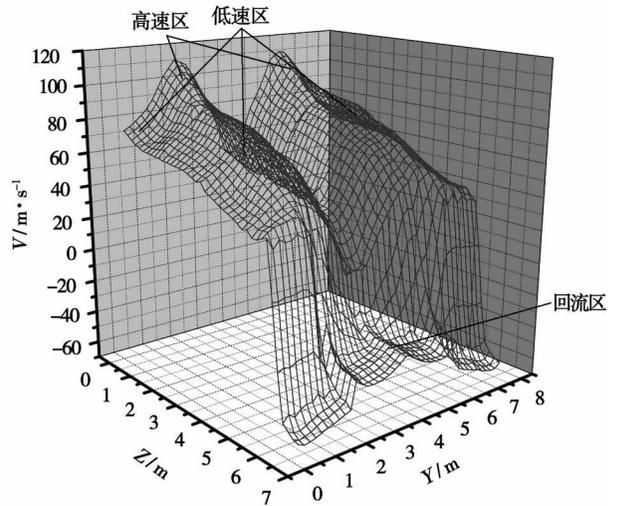


图 8 蒸汽湿度为 6% 时喉部出口流场分布

### 3 结论

应用直接模拟蒙特卡罗方法, 对凝汽器喉部内考虑蒸汽热动力行为的流动状况和蒸汽凝结对喉部的阻力性能的影响进行了模拟计算, 得出了如下结论:

- (1) 随着蒸汽湿度的增大, 凝汽器喉部的进、出口平均速度有所降低, 并能够在一定程度上降低喉部的流动阻力;
- (2) 由于喉部流场的极不均匀, 喉部各区域的压力不同, 使得各区域的湿度分布也不相同, 且两者具有相同的变化规律。
- (3) 由于凝结效应的存在, 使得汽轮机排汽湿度越大, 喉部的出流均匀性就越好。

综上所述, 由于蒸汽湿度的存在, 虽然使得喉部的流动阻力得到了减小, 喉部流动性能得到一定程度的改善。但是蒸汽湿度的存在可以降低汽轮机的级效率, 并能够引起叶片严重水蚀。因此, 在汽轮机的实际运行过程中, 一般不会采用增大蒸汽湿度的

图 7 和图 8 分别表示蒸汽相对湿度为 2% 和

方法来改善喉部的阻力性能和流场分布状况。

### 参考文献:

- [1] 王乃宁, 张志刚. 汽轮机热力设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987
- [2] 张冬阳, 蒋洪德, 刘建军. 考虑若干影响的一元蒸汽凝结流数值解[J]. 工程热物理学报, 2001, 22: 25-28.
- [3] 崔国民. 汽轮机凝汽器喉部合理设计及布置研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2000.
- [4] 李 亮, 丰镇平, 陈红梅. 凝结理论在汽轮机设计中应用的探讨[J]. 热力透平, 2005 34(1): 36-40
- [5] 斯蒂弗 H G. 气体动力学基本原理(F 篇): 高速流体中的凝结现象[M]. 徐华舫, 译. 北京: 科学出版社, 1988
- [6] STARTOR R F. A theoretical model of supersonic steam nozzle behavior [D]. Columbus: The Ohio State University, 1996
- [7] GERBER A G, KERMANI A. A pressure based eulerian-eulerian multi-phase model for non-equilibrium condensation in transonic steam flow [J]. Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 2217-2231
- [8] 李 军, 王祖温, 包 钢. 气动充排气系统中的水蒸气凝结现象及其影响因素[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(2): 92-96
- [9] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002
- [10] 崔国民. 军用目标红外热像理论建模中的蒙特卡罗和并行计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998.

(编辑 董 斌)

## 整体煤气化联合循环

### 离子迁移膜氧(ITM)技术

据《Gas Turbine World》2008 年 1~2 月号报道, 现低温空气分离装置建造和运行的费用十分大, 约占 IGCC (整体煤气化联合循环)装置总投资费用的 15%, 并耗费约 15%装置总输出功率。

DOE(美国能源部)正在进行的先进的 IGCC 技术计划继续把开发 ITM(离子迁移膜)技术作为目标, 以比低温空气分离装置更低的投资费用和能源消耗来生产氧。

差别: 目标是使生产氧的成本减少 1/3, 即相当于根据 IGCC 装置净输出功率的 100 美元/kW。

效率: 借助于使附加的功率损失减少 35%~60%, 使 IGCC 装置的净效率至少提高 1%。

时间表: 即 150 t/d 示范装置于 2009~2010 年开始试验, 并在 2012~2013 年 2 000 t/d 大型试验装置开始试验。

生产大量氧气的低温空气分离过程是世界上用于氧气生产的一种可靠和安全的过成, 但费用大、能耗高。

当前, 基于低温的空气分离装置设计占约 15%IGCC 装置总的投资费用和消耗约 15%装置总的输出功率。

与此形成对比, 使用陶瓷 ITM 技术从空气中分离出纯氧可以明显减少设备的费用和附加的动力消耗(装置的输出功率增加 15%), 并使整个装置的效率增加 10%。

ITM 空气分离是一种由横过薄陶瓷膜的氧分压梯度驱动的电化学过程, 它是一种一步式过程, 并在升高的压力和温度(816~889 °C)范围内工作的最好, 说明 ITM 适用于与 IGCC 装置相结合。

(吉桂明 供稿)

中国城市垃圾典型组分热解特性及动力学研究 = A Study of Pyrolysis Characteristics and Kinetic Analysis of Typical Constituents of Municipal Solid Wastes in China [刊, 汉] / ZHANG Chu, YU Juan, FAN Di, et al (Thermal Energy Research Institute, College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 561 ~ 566

A thermogravimetric analytic test has been conducted of typical constituents of municipal solid wastes in eight categories and a pyrolysis index was proposed to feature the pyrolysis characteristics. The higher the pyrolysis index, the easier the waste can be pyrolyzed. The results of the study indicate that raising its heating rate is conducive to increasing the pyrolysis index. With a same pyrolysis index and particle diameter, the pyrolysis capacity of the constituents in question can be ranked in the following order from high to low: waste plastic, waste paper, waste leather, melon peels, chemical fibers, fallen leaves, plants and waste rubber, among which the waste plastic has a pyrolysis index way above that of other seven constituents. By adopting an integral method to process the pyrolysis test data, reaction kinetics parameters and a reaction-rate control equation were obtained, thereby establishing a kinetics model for the corresponding operating conditions and temperature intervals. It has been found that for different waste constituents, their reaction mechanism may be different, and so will be their corresponding pyrolysis kinetic models. **Key words:** MSW (municipal solid waste), constituent, pyrolysis, thermogravimetric analysis, kinetics analysis

内部结构对空冷叶片换热性能的影响 = The Influence of Inner Structures on the Heat Exchange Performance of Air-cooled Blades [刊, 汉] / SU Sheng, HU Jie, LIU Jian-jun, et al (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 567 ~ 571

To gain a profound understanding of the cooling mechanism and cold-air flow characteristics of air-cooled turbine buckets, an air-thermal coupled numerical simulation has been conducted of the buckets in question. It has been found that blade tip air-film holes can speed up the cold air flow in the coil-tube passages and improve cooling effectiveness. The reduction of the width-height ratio of the sub-channel in the vortex matrix passage can increase the flow resistance in the affected passage, leading to a fuller utilization of the cold air in the passage. However, this may lower the cooling capacity of the cold air and contribute to a temperature rise at the trailing edge. Hence, there exists an optimum make-up relationship between the width-height ratio and the cold-air inlet condition. Furthermore, the clearance between the vortex matrix passage structure and the blade tip may lower the utilization rate of the cold air. **Key words:** air-cooled blade, air-thermal coupling, blade-tip air-film hole, coil tube finned passage, vortex matrix passage, blade-tip inner clearance

考虑蒸汽热力行为的凝汽器喉部流动模拟 = A Condenser-throat Flow Simulation With Due Consideration of Steam Thermodynamic Behavior [刊, 汉] / ZHANG Lei-lei, CUI Guo-min, GUAN Xin, et al (Thermodynamic Engineering Research Institute, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 572 ~ 576

By adopting steam condensation nucleus formation theory and from the viewpoint of describing the microscopic mechanism governing the steam condensation nucleus formation, an analysis of the distribution law of spontaneous condensation nucleus and its formation rate was conducted respectively and a probabilistic model, established for steam molecule condensation. On this basis, a simulation calculation was performed of the thermodynamic behavior of the steam passing through the condenser throat of a steam turbine by adopting a direct simulation Monte Carlo method. In addition, the influence of the steam wetness in the condenser throat on the flow resistance and uniformity was studied. The calculation results show that with the steam thermodynamic behavior being taken into consideration, the flow resistance of the steam can be reduced, and in the meantime the steam distribution in the flow field of the condenser throat can also be improved to a certain degree. **Key words:** condenser-throat, steam thermodynamic behavior, condensation nucleus, nucleus formation rate theory, DSMC (direct simulation Monte Carlo method)-based simulation