专题综述

文章编号:1001-2060(2008)06-0561-06

# 中国城市垃圾典型组分热解特性及动力学研究

张 楚,于 娟,范 狄,章明川 (上海交通大学机械与动力工程学院,上海 200240)

摘要:对城市生活垃圾中的8种典 型组分进行了热重分析实验,提出热 解指数来表征垃圾的热解特性.热解 指数越高,垃圾越容易热解。结果表 明,提高加热速率有助于增大热解指 数;相同加热速率和粒度条件下,8种 垃圾组分的热解能力依次为: 废塑料、 废纸张、废皮革、瓜皮类、化纤、落叶、 植物类 厨余 和废橡胶, 其中 废塑 料的 热解指数远远大干其它7种组分。用 积分法对热解实验数据进行处理,得 出反应动力学参数及反应速率控制方 程。从而得到相应工况和温度区间下 的动力学模型。可以看出,垃圾组分 不同,其反应机理可能不同,相对应的 热解动力学模型也不同。

#### 关 键 词: 垃圾; 组分; 热解; 热重分 析; 动力学分析

中图分类号: TK6 文献标识码: A

引 言

目前我国城市生活垃圾的年 产量达1.3亿t,往年累计堆存量 达6.0亿t,占地约3.3万km<sup>2</sup>。 而实际垃圾处理能力远跟不上垃 圾产生量的增长,全国有近2/3 的城市形成了垃圾包围城市的严 重局面。未能有效处理的垃圾在 堆积、简易填埋等过程中产生了 大量的酸碱有机物,并溶解出垃 圾中的重金属,这不仅对大气、 水、土壤和植物等人类赖以生存 的环境造成污染,而且还要侵占 大量的土地,这对于土地资源本 来就十分贫乏的我国来说,是十 分沉重的负担。

垃圾热解技术以其较高的能 源利用率和较低的二次污染排放 而被认为是垃圾焚烧技术的下一 代垃圾热化学处理技术[1~3]。热 解法也称为裂解法,是把有机废 弃物在无氧或贫氧条件下加热到 600~900 ℃,用热能使化合物的 化合键断裂,由大分子量的有机 物转化成小分子量的可燃气体、 液体燃料和焦炭的过程。这种技 术与焚烧法相比温度较低,无明 火燃烧过程,重金属等大都保持 原状在残渣之中,可回收大量的 热能 尤其是此种方式具有二 🛲 英产生的逆条件,较好地解决了 垃圾焚烧技术的最大难题。

热重法是在程序控制温度下 借助热天平获得物质的质量与温 度关系的一种技术,通常在恒定 的升温速率下进行,是研究化学 动力学的重要手段之一,具有试 样用量少、速度快,并具有能在温 度测量范围内研究原料受热发生 热反应动力学的实验方法通常 有等温法(也称静态法)和非等温 法(也称动态法)<sup>[4]</sup>。在本文研究 中,将采用非等温法对生活垃圾 典型组分的热解特性及反应动力 学参数进行研究。

1 热重实验

本次研究选择了垃圾中的 8 种典型组分进行实验,分别为:废 橡胶、废皮革、废塑料、废纸张、瓜 皮类、化纤、植物类厨余和落叶, 其中瓜皮类选用的是香蕉皮,植 物类厨余选用的是莴苣叶,其工 业分析值如表 1 所示。由于实验 材料都属于软质材料,无法用机 器破碎,因此全部采用手工切割 制取。

表1 城市生活垃圾组分工业分析结果(%)

	水分	灰分	挥发分	固定碳
废橡胶	0. 538 0	28 94	52 35	18 17
废皮革	0. 778 1	20 87	67.51	10 85
废塑料	0. 002 0	1. 387	98 39	0 219 6
废纸张	5. 435	24 66	63 32	6. 589
瓜皮类	67.36	2. 874	24 60	5. 165
化纤	0. 452 6	8. 164	90 77	0 611 5
植物类厨余	94. 01	1. 030	4. 821	0 141 3
落叶	9. 005	6. 544	68 75	15 71

实验仪器为 WRT-2P 型微量 热天平,采用高纯 N<sub>2</sub> 为载气,流 量为 160 mL/min;加热速率为 10、20 和 30 ℃/min;热解终温为 600 ℃。试样重量一般控制在 4 ~5 mg 之间,粒度大小分别为 0.5 和 1.0 mm。为了消除水分蒸

收稿日期: 2007-11-16; 修订日期: 2008-03-12

作者简介: 320 楚(1984-) 思·湖北荆州人,上海交通大学博士研究告: Shing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发对热重分析产生的影响, 实验 前样品在 100 <sup>℃</sup>的干燥箱内干燥 1 h。

2 实验结果及分析

 2.1 升温速率对热解特性的影响 对废橡胶与废塑料进行了在 相同粒度下,升温速率为 10、20 和
 30 ℃ min 的 热重 实验, 热重 TG (失重率)曲线如图 1 和图 2 所示。



图1 废橡胶在3种升温速率下的热重曲线



图 2 废塑料在 3 种升温速率下的 热重 曲线

由图 1 的实验结果可以看 出,整个热解失重过程一般可分 为4 个温度区间:脱水、保持、剧烈 失重和缓慢失重。按此归类分为 4 个区间,第一区间中,TG 曲线出 现一段幅度很小的下降,试样有 略微的失重,该温度区间一般是 试样随着温度的升高开始失去残 品都经过了干燥,但由于样品的 易吸水性和实验准备过程中不可 避免地暴露在空气中,样品中多 少会含有一定量的水分。第二区 间中,TG 曲线几乎成一直线,该温 度区间一般是样品中的水分已完 全析出,但尚未开始热解的阶段。 各个样品不同,这个区间的长度 也不同,越短说明试样开始热解 的时间越早,其结束时对应的特

> 征点时间和温度分 别为  $t_1$  和  $T_1$ 。第三 区间中,TG 曲线急 剧下降,该区间是试 样热解失重过程的 主要阶段,试样的绝 大部分失重发生在 该区间,失重率可高 达 50%以上,其开始 和结束时对应的特 征点时间、温度分别 为  $t_1$ 、 $T_1$ 和  $t_2$ 、 $T_2$ 。 第四区间中,TG曲 线开始趋于平缓。 该温度区间是残留 物的缓慢分解过程。 并在最后生成固定 碳和灰分。在反应 结束时,橡胶的热重 曲线还没有完全水 平,说明热解并没有 完全结束,仍会继续 反应并有固定碳和 灰分的生成。

而废塑料的热 解 TG 曲线却有不

同,并没有明显的第一区间,而是 几乎成一直线,为试样尚未热解 的阶段。整个废塑料热裂解分成 3个区间<sup>[1]</sup>,即:缓慢裂解、快速 裂解和再缓慢裂解。这表明塑料 与橡胶的化学组成不同,热解的 过程也不相同。

### 垃圾热解过程是一个复杂的

反应过程,假设其符合简单的动 力学方程,定义 α为试样在热解 过程中的消耗份额:

 $\alpha = (W_0 - W)/(W_0 - W_\infty)$ 式中:  $W_0$ —试样初始质量; W— 试样在温度为*T*时的质量;  $W_\infty$ —试样最终质量。

由于每次实验过程中加热速 率不变,因此 $\alpha \sim T \pi \frac{d\alpha}{dt} \sim T$ 可 以由 TG( $W \sim t$ )曲线和 DTG( $\frac{dW}{dt}$ ~t)曲线计算得到,换算式为:

$$\frac{\mathrm{d}\,\alpha}{\mathrm{d}t} = -\left(W_0 - W_\infty\right)^{-1} \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

为了反映热解速率 dα/dt 与温度之间的关系, 另定义一个 表征热解特性的指标──热解指 数, 其定义如下:

 $I = (d\alpha/dt)_{max}/(T_{max} \times \Delta T)$  (3) 式中:  $\alpha$ -试样消耗份额;  $(d\alpha/dt)_{max}$ -最大失重率;  $T_{max}$ -对应 于最大失重率的温度;  $\Delta T = T_2 - T_1$ ,  $T_1$  是失重率开始急剧增大时 的温度,  $T_2$  是失重率急剧减小并 趋于平缓时的温度。

表2给出了主要的热解特性 参数。观察这些试样在不同加热 速率下的各个特征点数值,可以 发现  $t_1, t_2, t_{max}$  随加热速率的增大 而减小,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_{\text{max}}$ 、(d  $\alpha$ / d t)<sub>max</sub> 随加热速率的增大而增大。即加 热速率越大,各个样品越早开始 热解失重,最大失重率越大,同时 开始失重、失重率达到最大和结 束失重时的温度也越高。还可以 看出,尽管样品种类不同,但其各 自的热解指数 I 都随着加热速率 的增大而增大。也就是说,在不 同样品相同粒度条件下进行的不 同加热速率热解实验都得到同样 的一个结论:加热速率提高,热解 指数增大,垃圾更容易热解,即提 高加热速率有助于垃圾的热解。

	加热速率	样品粒度	$T_{1}$	$T_2$	$T_{\rm max}$	$(\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t)_{\mathrm{max}}$	$I(\times 10^{-6})$
	∕ °C°min <sup>−1</sup>	/mm	∕ °C	∕ °C	∕ °C	/ $\%  {\rm °min}^{-1}$	$/ \frac{0}{0}  {}^{\circ} min^{-1}  {}^{\circ} K^{-2}$
	10		255	405	320	0. 027 66	0 576 24
废橡胶	20	1. 0	270	430	340	0. 144 44	2 655 23
	30		295	495	345	0. 265 82	3 852 46
	10		390	450	430	0.31513	12. 214 19
废塑料	20	1. 0	415	470	440	0. 525 70	21. 723 18
	30		420	495	455	0. 797 27	23. 363 12

表 2 经换算和计算所得特征点及热解指数

## 2.2 物质种类对热解特性的影响

图3给出皮革、废纸张、瓜皮类、化纤、植物类

#### 厨余和落叶等垃圾在相同粒度,相同升温速率下的 热重 TG (失重率)和 DTG (失重速率)曲线。



图 3 垃圾典型组分的 热解实验 曲线(粒度:1.0 mm; 加热速率: 10 ℃/min) ?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net 表 3 给出了不同垃圾组分经换算后所得的特征 点及热解指数。由实验结果数据中可以看到, 当加 热速率和粒度条件都相同时(10 °C/min 和 1.0 mm), 所有8种生活垃圾典型组分中,废塑料的热解指数 最大,说明其最容易热解,其它依次为:废纸张、废皮 革、瓜皮类、化纤、落叶、植物类厨余和废橡胶。

表 3 不同垃圾组分特征点及热解指数

	加热速率	样品粒度	$T_1$	$T_2$	$T_{\rm max}$	$(d\alpha/dt)_{max}$	$I(\times 10^{-6})$
	/ $^{\circ}C_{\text{min}}^{-1}$	/mm	∕ °C	∕ °C	∕ °C	/ ½ °min <sup>-1</sup>	/ $\%$ °min <sup>-1</sup> °K <sup>-2</sup>
废橡胶	10	1. 0	255	405	320	0. 027 66	0. 576 24
废皮革	10	1. 0	150	265	210	0.097 22	4. 025 77
废塑料	10	1. 0	390	450	430	0.31513	12. 214 19
废纸张	10	1. 0	240	345	310	0. 237 11	7. 284 59
瓜皮类	10	1. 0	120	325	245	0. 100 69	2. 004 87
化纤	10	1. 0	300	445	400	0.11314	1. 950 67
植物类厨余	10	1. 0	120	290	245	0.032 31	0. 775 82
落叶	10	1. 0	170	410	290	0.05844	0. 839 68

#### 2.3 粒径对热解特性的影响

本次研究在相同的加热速率 下分别对废橡胶和废塑料进行了 不同粒度大小的热解实验,如图 4 所示,所取的两种不同的粒度 大小分别为 0.5 和 1.0 mm。表 4 给出了不同粒度大小的废橡胶和 废塑料的热解指数。

由所得的实验结果数据可以 看到,废橡胶和废塑料的热解指 数随着粒径的变化都不太明显。 进一步观察两者在不同试样粒度 大小下各个特征点数值,发现废 橡胶的所有特征点数值都随试样 粒度的增大而增大,而废塑料的 所有特征点数值都没有明显的变 化,无法得出有价值的规律性。



图4 不同粒径下的垃圾热解曲线

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

	加热速率 /℃•min <sup>−1</sup>	样品粒度 /mm	<i>T</i> <sub>1</sub> ∕ ℃	<i>T</i> <sub>2</sub> ∕ ℃	<i>T</i> <sub>max</sub> ∕ ℃	$(d\alpha/dt)_{max}$ / $\frac{1}{2}$ °min <sup>-1</sup>	$I(\times 10^{-6})$ / % °min <sup>-1</sup> °K <sup>-2</sup>
废橡胶	30	0.5	275	445	340	0. 145 83	2 523 07
	30	1. 0	295	495	345	0.265 82	3 852 46
広ち並且水と	30	0.5	420	485	455	0.85586	28. 938 49
发型科	30	1. 0	420	495	455	0. 797 27	23. 363 12

表 4 不同粒径垃圾组分的特征点及热解指数

2.4 典型垃圾组分热解动力学 分析

由 2 1 节的研究内容可知, 热解失重阶段主要分布在第三阶 段,本文主要针对整个热解失重 过程中的失重最明显区间进行研 究<sup>[5~8]</sup>,假设在无限短的时间间 隔内,非等温过程可看作等温过 程,垃圾的总体热解速率可以表 示为:

$$\begin{pmatrix} \frac{\mathrm{d}\,\alpha}{\mathrm{d}\,t} = k\,^{\circ}f(\alpha) = A \times \\ \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)\,^{\circ}f(\alpha) \qquad (4) \\ \vec{\mathrm{式}}\mathbf{\dot{\Pi}}: A - \mathbf{\dot{\Pi}}$$
因子,  $\min^{-1}; k - \mathbf{\bar{K}}$ 

应速率常数,  $\min^{-1}$ ; R一气体常数, 8.31 kJ/(mol°K); E一活化能, kJ/mol; T一温度, K;  $f(\alpha)$ 一 固体反应物中未反应产物与反应 速率有关的函数, 它的大小取决 于反应机理。

热天平实验数据处理方法有 微分法和积分法,本研究选用积 分法处理实验数据。

송:

$$F(\alpha) = \int_{0}^{\alpha} \frac{1}{f(\alpha)} d\alpha \qquad (5)$$
加热速率 B=dT/dt=

const, <sup>°C</sup>/min, 由式(4)和式(5)可 得:

$$\int_{0}^{\alpha} \frac{\mathrm{d}\alpha}{f(\alpha)} = F(\alpha) = P(x) \times$$

$$\left(\frac{\underline{AE}}{BR}\right) \qquad (6)$$

$$P(x) = \frac{e^{-x}}{x} - \int_{x}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} \mathrm{d}x =$$

 $\frac{e^{-x}}{x} + E_i(-x), \left(x = \frac{E}{RT}\right)$ (7) 式中:  $E_i(-x)$ — 指数积分; T— 对应于  $\alpha = \alpha(t)$ 的温度。

对式(7)两边取对数:

 $\ln F(\alpha) - \ln P(x) = \ln (AE/BR)$ (8)

式(8)右端与温度无关,而左 端与温度有关,近似认为 $-\ln P$ (x)是 1/T的线性函数,则 lnF( $\alpha$ )也必然是 1/T的线性函数, 从式(2)~式(4)可看出,P(x)既 与温度 T 有关又与E 有关。P(x)的表达式:

 $\ln P(x) = -0.256E^{0.44} - \frac{(0.499 \pm 0.526E) \times 10^3}{T}$ (9)

将式(9)代入式(8)后得:

$$\ln F(\alpha) = \ln \frac{AE}{BR} - 0.256E^{0.44} - \frac{(0.45 \pm 0.053E) \times 10^3}{T}$$
(10)

把  $\alpha \sim T$ 数据代入 $F(\alpha)$ 的 函数式,从  $\ln F(\alpha)$ 对应于 1/*T* 的 数据中,在某一确定的温度范围 内可以找到一个函数  $F(\alpha)$ ,使 得  $\ln F(\alpha)$ 和 1/*T* 成线性关系,根 据式(10)即可算出动力学参数 *E* 和*A*,而这个反应机理方程式 *F* (α)所对应的反应速率函数式 *f* (α)就是相应温度范围内的热解 动力学模型。

本文选取了3个热解动力学 反应机理方程式,对城市生活垃 圾8种典型组分进行动力学分  $fi^{[4]}, 它们分别为: (1) F(\alpha) = (1-\alpha)^{-1}-1, 对应 f(\alpha) = (1-\alpha)^{2}; (2) F(\alpha) = \alpha^{2}, 对应 f(\alpha) = \alpha^{-1}/2; (3) F(\alpha) = (1-\alpha)\ln(1-\alpha) + \alpha, 对应 f(\alpha) = [-\ln(1-\alpha)]^{-1}.$ 

首先对热重实验各个工况下 的TG( $W \sim t$ )曲线分别取上述 3 个反应机理方程式转换为 hF ( $\alpha$ ) ~  $\frac{1}{T}$ 曲线,并对其分别作直 线拟合,3条 hF( $\alpha$ ) ~  $\frac{1}{T}$ 曲线中 线性拟合度最高的一条曲线对应 的 $F(\alpha)$ 就是相应工况下所应选 择的反应机理方程式,从而得出 这个工况下的所研究温度区间的 热解动力学模型 $f(\alpha)$ ,并进一步 根据式(10)求出动力学参数 *E* 和*A*。其动力学分析结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出, 在本实验 条件下, 废塑料的热解活化能最 高, 而果皮、植物类和皮革类的活 化能较低。本实验采用的 3 种反 应机理方程式得出的拟合曲线线 性度都非常高。应该注意到, 由 于城市固体废弃物中各种可燃物 的组成变化及各组分的性质存在 较大差异, 如果直接焚烧必然会 对焚烧炉的设计带来困难。而它 们的热解却具有良好的共性, 因 此垃圾热解后再处理会大大提高 垃圾的利用率, 不失为城市固废 的能源化利用的一个新思路<sup>[9</sup>。

表 5 各工况下垃圾组分的热解动力学参数(最大失重区间)

	加热速率	样品粒度	$T'_1$	$T'_2$	Ε	A	反应速率控制
	/ $^{\circ}C^{\circ}min^{-1}$	/ mm	∕ °C	∕ °C	$/  kJ^{\circ}  mol^{-1}$	$/min^{-1}$	方程式 <i>f</i> (α)
	10		325	370	301 231 5	1.01169E+11	$f(\alpha) = \alpha^{-1}/2$
废橡胶	20	1. 0	350	395	333 530 4	2.09235E+12	$f(\alpha) = \alpha^{-1}/2$
	30		355	400	335 577 5	3. 2838E+12	$f(\alpha) = \alpha^{-1/2}$
废皮革	10	1. 0	200	265	198. 2352	2 604 055 904	$f(\alpha) = (1-\alpha)^2$
	10		440	450	489 711 1	1. 16308E+14	$f(\alpha) = \alpha^{-1}/2$
废塑料	20	1. 0	455	470	717. 693 8	2.51472E+21	$f(\alpha) = \alpha^{-1}/2$
	30		480	495	162 520 2	1. 21111E+51	$f(\alpha) = \alpha^{-1}/2$
废纸张	10	1. 0	310	345	426 207 5	8.37488E+15	$f(\alpha) = \alpha^{-1}/2$
瓜皮类	10	1. 0	200	275	84. 253 11	27 019. 203 74	$f(\alpha) = (1-\alpha)^2$
化纤	10	1. 0	355	405	328 479 2	69 571 778 950	$f(\alpha) = \alpha^{-1}/2$
植物类厨余	10	1. 0	190	220	94.65867	7 866. 779102	$f(\alpha) = \alpha^{-1}/2$
落叶	10	1. 0	255	315	130 191 1	1 097 484. 93	$f(\alpha) = (1-\alpha)^2$

#### 3 结 论

深入研究了城市生活垃圾中 8 种典型组分(废橡胶、废皮革、 废塑料、废纸张、瓜皮类、化纤、植 物类厨余和落叶)的热解特性,并 对其热解过程中的最大失重区间 进行了动力学分析,可以得出以 下结论:

 (1)垃圾热解失重主要可分 为干燥、过渡、失重、缓慢分解4
 个温度区间。

(2)提高加热速率有助于垃圾的热解,加热速率越大,热解指数越大,垃圾越容易热解;同时加热速率越大,热解失重开始得越早,最大失重率越大,而开始失重、失重率达到最大和结束失重时的温度也越高。

(3)相同加热速率和粒度条件下,8种生活垃圾典型组分的 热解能力依次为:废塑料、废纸 张、废皮革、瓜皮类、化纤、落叶、 植物类厨余和废橡胶,其中废塑 料的热解指数远远大于其它7种 组分。

(4)相同组分和加热速率条 件下,不同粒度得到的热解指数 都不明显,故无法得出有价值的 规律性。

(5) 垃圾热解是一个复杂的 反应过程, 简单地认为垃圾热解 反应是一级或二级反应是不合适 的。本文得到了垃圾典型组分在 12 种工况下最大失重区间的热 解动力学参数 *A* 和*E* 及相应的 热解动力学模型。可以看出, 垃 圾组分不同, 其反应机理可能不 同, 相对应的热解动力学模型也 不同。

#### 参考文献:

[1] 冯新华,龙世刚,张龙来,等.废塑料
 与煤粉的热解特性对比及热力学研究
 [J].钢铁研究学报,2006,18(11):11-26

- [2] 沈祥智, 严建华, 白丛生, 等. 主要垃圾组分热解动力学模型的优化及比较
   [J]. 化工学报, 2006, 57(10): 2433-2438
- [3] 吴旺明, 严建华, 温俊明, 等. 垃圾典
   型组分混合热解特性的实验研究[J].
   环境科学与技术, 2005, 28(5):21-42
- [4] 白丛生,李晓东,沈祥智,等..等温环 境下垃圾热解影响因素分析[J].能源 工程,2006(2):48-51.
- [5] 于 娟,章明川,沈 轶,等.生物质 热解特性的热重分析[J].上海交通大 学学报,2002,36(10):1475-1478.
- [6] HSIAO Y, NOBE K Oxidative reaction and chlorobenzene with in situ electro generated Fenton's reagent[J]. Chem Eng, 1993 126(1):97-110
- [7] SHEN XING. Differential themal analysis themogarvinetry analysis and non-isothemal solid-phase reaction kinetics [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press 1995
- [8] 李余增.热分析[M].北京:清华大学 大学出版社,1987.
- [9] 柯 威,熊 伟,刘景雪,等.城市固体废弃物热重分析及热解动力学研究
   [J].可再生能源,2006(5):53-56

(编辑 韩 锋)

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 themogravimetric 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, themogravimetric 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<sub>0</sub> (direct simulation Monte Carlo method)-based simulation groups House. All rights reserved. http://www.cnki.net