

医疗废物热解焚烧处理研究

孟庆敏, 陈晓平

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 目前, 对医疗废物热解焚烧技术的研究主要集中在热动力学方面, 其中包括分析热解过程及影响因素, 并建立更加精确的动力学模型。研究从医疗废物的物化特性、热解焚烧过程的反应动力学特性、小型试验规模及数值模拟等方面评述了医疗废物热解焚烧处理技术在近些年取得的进展。并指出在固定床实验台上研究物料特性、热解焚烧条件对较大物料量医疗废物热解焚烧过程的影响规律, 以及建立包含单颗粒模型的物料床层模型是今后的研究工作尚待深化解决的问题。

关 键 词: 医疗废物; 热解; 焚烧; 物化特性; 热解模型

中图分类号: TK16

文献标识码: A

引 言

医疗废物是指各类医疗卫生机构在医疗、预防、保健、教学、科研以及其它相关活动中产生的具有直接或间接感染性、毒性以及其它危害性的废物^[1]。目前, 我国年产医疗垃圾近 100 万 t, 并以每年约 3%~6% 的速度递增, 大

多医疗废物没有得到妥当的处置, 给环境、社会带来了很大的安全隐患^[2]。目前, 国际上最先进的焚烧技术是热解焚烧技术, 典型的热解焚烧系统包含热解炉和燃烧炉, 是将有机物在热解炉无氧或只有少量氧气的条件下加热, 利用热能使其分解为小分子的可燃气体, 同时也生成少量的液体及油等, 然后使燃气在燃烧炉进行完全燃烧, 通常要求燃烧炉的温度在 1 100 °C 以上, 停留时间在 2 s 以上^[3]。医疗废物热解处置技术有许多优点, 首先, 热解处理使得有机物转化为可利用的燃气, 进入燃烧室作为燃料, 减少外界燃料供应; 其次, 燃气过量空气系数较低, 大大降低了排烟量, 减少了二次污染; 第三, 热解炉在低温缺氧条件下运行, 减少二噁英前驱物的生成, 并且重金属没有被氧化, 减少了其成为二噁英形成的催化剂的几率, 因此在控制二噁英方面也有明显的优势^[3~4]。

对医疗垃圾的物化特性与热

解焚烧特性的深入认识是进行医疗垃圾热解过程优化和保证系统整体功能正常发挥的基础。本研究从医疗废物的物化特性、热动力学研究、热解焚烧试验规模的研究以及医疗废物热解焚烧过程的数值模拟 4 个方面对医疗废物热解焚烧处理在近些年取得的研究成果进行总结, 探讨了医疗废物热解焚烧处理的一些新的研究方向。

1 医疗废物的物化特性

医疗废物的理化组成因地区、医疗卫生机构性质、规模不同而差异较大, 并且医疗废物种类繁多, 即便是同一种组分品质和特性也可能大不相同, 而这些都从根本上影响热解焚烧过程, 因此了解其物化特性是更好地处理医疗废物的基础。李剑、王玉如等人对医疗废物几种典型可燃组分的工业分析以及热值等物化特性进行了实验研究^[4~5], 结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 医疗废物典型可燃组分的工业分析(空气干燥基)

工业分析 /%	医用脱脂棉	医用纱布	医用棉签棒	面巾纸	医用一次性口罩	聚丙烯	医用乳胶手套
M_{ad}	1.36	1.42	2.29	2.65	0.22	0.05	0.17
A_{ad}	0.35	0.10	0.50	0.04	1.91	0.02	4.08
V_{ad}	91.25	94.20	86.99	92.83	94.67	99.92	95.75
FC_{ad}	7.04	4.28	10.67	4.48	3.20	0.01	—

注: 计算结果采取小数点后 2 位数, 其中“—”表示无。

收稿日期: 2009-10-10 修订日期: 2009-11-13

作者简介: 孟庆敏(1984—), 女, 江苏连云港人, 东南大学博士研究生。

表 2 医疗废物典型可燃组分的空气干燥基的低位热值

医用脱脂棉	医用纱布	医用棉签棒	面巾纸	医用一次性口罩	聚丙烯	医用乳胶手套
低位热值 /kJ·kg ⁻¹	15 024.49	14 868.04	16 579.89	14 711.7	40 953.58	39 995.18

从以上结果可以看出, 医疗废物各可燃组分的灰分含量都在 5% 以下, 热解焚烧处理可以达到很好的减容效果; 而医疗废物挥发分含量均大于 86%, 挥发分是热值的重要来源。可燃组分的热值大约在 14 711.7 ~ 43 449.11 kJ/kg 的范围内, 较高的热解气热值使燃烧炉能够在不需要外加很多辅助燃料的情况下稳定连续地运行。因此, 医疗废物各可燃组分具有水分含量低、灰分少、挥发分含量高、热值高的特性, 这些特性使得热解焚烧技术成为医疗垃圾处理的优选方案。

2 医疗废物热解焚烧过程的反应动力学研究

热重法是近年来被广泛使用的热分析技术, 它可以连续测量样品的失重和失重速率, 只需 1 条或数条热重曲线就可获得样品的热分解特性和动力学参数。热重—傅立叶变换红外光谱仪联用技术可以直接测定样品在受热过程中分解或降解产物的化学成分。国内一些研究单位的学者利用热重法及热重—红外联用法对医疗废物各组分进行了热动力学研究, 国外未见有对医疗废物各组分全面系统的研究。

2.1 医疗废物的热解特性及影响因素研究

医疗废物的成分大致分为: 塑料类、橡胶类、生物质类、蛋白质类、化纤类和药物类。前人对于医疗废物的研究基本包含了所有的类别, 卿山等人的研究结果如图 1 所示^[6], 从热重曲线上可以清楚地看到热解焚烧过程可分

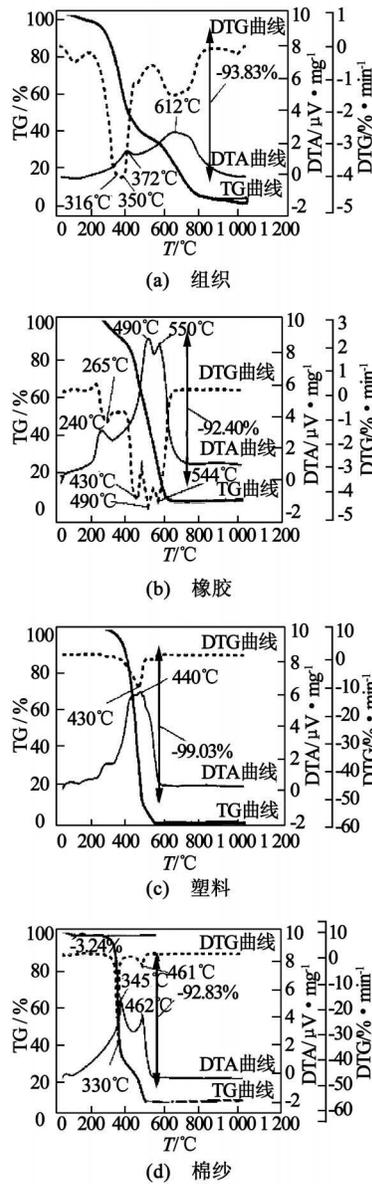


图 1 模拟医疗废物 TG 和 DTG 曲线

为脱水干燥、挥发分析出和燃烧、过渡阶段以及固定碳表面燃烧过程。其中, 最早进入失重阶段的是生物质类和蛋白质类, 其次是橡胶类和塑料类。从失重峰来看, 塑料的失重比较集中, 有一个主要的失重峰, 组织和棉纱主要有一大一小两个失重峰, 前一个

失重峰主要是挥发分的析出和燃烧, 后一个则是焦炭的燃烧。失重量与表 1 各组分的挥发分含量呈现出较好的对应关系。

对于医疗废物的单个组分而言, 主要影响因素包括热解气氛、升温速率以及组分之间的相互影响等。

在热解气氛方面, 孙振鹏发现空气气氛下的失重峰多于 N₂ 气氛下的失重峰^[7], 失重区间也发生前移, 同时发现 N₂ 气氛下产生的气体中烃类和 CO 的体积百分比明显高于空气气氛下的百分比, 这是由于在 N₂ 气氛下物料进行无氧分解, 生成大量 CO 而在空气气氛下氧气的参与使大分子氧化, 生成大量 CO₂。这个结果与王玉如的结论不一致^[8], 文献 [8] 的研究表明, 在相同的气体流量条件下, 空气气氛下 CO 和 CO₂ 的产生量都明显大于 N₂ 气氛下。

在升温速率方面, 王玉如等人的研究结果如图 2 所示^[8], 随着升温速率的提高, 模拟医疗废物热失重时挥发分初始析出温度和失重速率峰值都向高温方向偏移; 同时, 升温速率越大, 失重速率越大。但是总失重率有所降低, 这是由于热解进行的时间短造成的, 可以考虑在恒温条件下考察热解时间对总失重的影响规律。

在不同医疗组分方面, 有学者认为热解时混合组分之间的影响可以忽略, 祝红梅等人认为各混合组分之间的影响很小^[9]。而王乔力等人发现输液管与另外一种样品混合后均发生相互作用

用^[10]。同样, 邓娜等人结果表明^[11], 输液管的存在会显著加速纱布的热解, 失重峰温明显降低; 纱布对输液管的热解存在轻微促进作用。

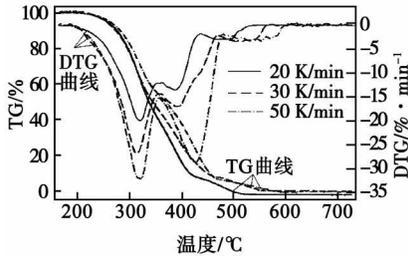


图 2 模拟医疗废物在空气气氛中的 TG-DTG 曲线

综合以上前人所做的热重方面的研究, 大多是在严格的程序控温下以恒定的升温速率进行热降解, 而实际的热解焚烧系统中, 医疗废物在一燃室长时间处于较低的温度下, 因此, 在某个恒定温度范围内的热解动力学将具有更实际的意义。并且由于实际的医疗废物通常不进行分类处理, 因此, 有必要对医疗废物不同组分之间的相互影响及机理做进一步的深入研究。

2.2 医疗废弃物热解的动力学模型

卿山等人通过热重实验得到模拟医疗废物燃烧过程的 TG-DTG 曲线后^[6], 选用 $f(\alpha) = 1 - \alpha^n$ 为反应机制函数对物料进行了分段动力学分析, 他认为不同的燃烧阶段需要用不同区段的一级反应来描述。李剑对医疗废物各组分建立了多步热解模型^[12], 认为物料在多个区间内发生独立反应, 反应机理函数为 $f(\alpha) = (1 - \alpha)^n$, 结果显示反应级数在 0.28 ~ 2.8 范围内变动。祝红梅对医疗废物进行了 N_2 气氛下动力学机理研究^[13], 得到对应各组分最适合的反应机理函数相应不同

组分的动力学参数, 结果表明, 最适合的机理函数主要集中在三维扩散及随机成核和随后生长。

由于实际的废物处理通常在有少量氧气参与下进行, 对于空气气氛下的热解机理也需要深入研究, 找出合理的机理函数。

3 医疗废物试验规模的热解焚烧研究

在热解特性和动力学方面, 前人已经做了大量研究, 但是 Yang 等人的研究表明^[14], 固定床热解能产出比 TGA 测试多 30% ~ 100% 的焦炭, 并且整个固定床反应器的升温速率在时间和空间上均与程序控温有明显差别。由此, 需要对医疗垃圾进行大试样量实验规模的研究。李东红等人在低温缺氧条件下对医疗垃圾典型组分进行了管式炉小试和立式炉中试热解试验^[15]。在试验中发现医疗垃圾主要成分的最佳热解温度在 400 ~ 600 °C, 热解产物主要为 CO, 但塑料较纸类、竹棒难热解, 热解产物主要有烃类和 CO, 结果如图 3 和表 3 所示。这与在热重-红外联用实验中分析得到的产物相对应。中试结果表明, 可燃成分热解温度范围在 370 ~ 618 °C, 热解气产生的峰值在 512 °C, 与小试结果吻合较好。

W. Jangsawang 等人实验研究了额定容量为 50 kg/h 控氧焚烧主燃室预热温度和废物批量大

小对废物燃烧的影响^[16]。结果显示, 增加废料入炉温度和重量会加速挥发分析出速率, 引起二燃室的“瓶颈效应”, 对焚烧炉的整体运行有一个消极的作用。

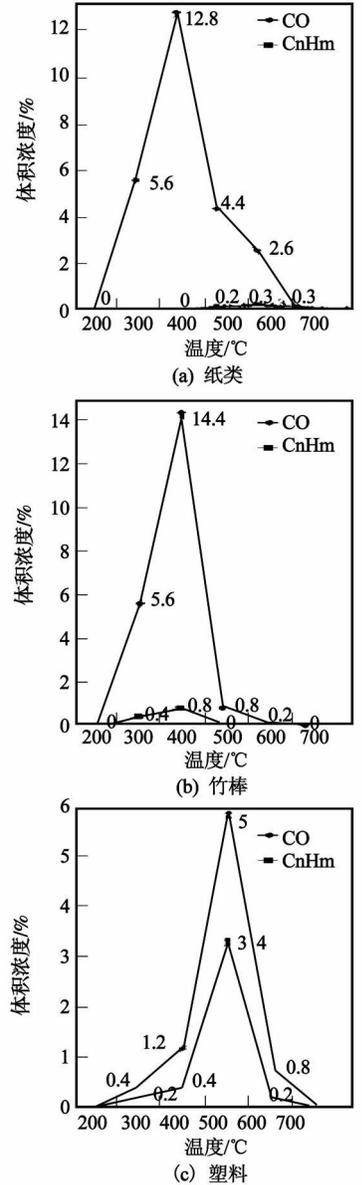


图 3 医疗垃圾热解小试实验结果

表 3 医疗垃圾中试实验结果

炉温 /°C	烟气量 /m³ · h⁻¹	测试热解组分浓度 /%				尾气中水汽体积浓度 /%
		CO₂	O₂	CO	CnHm	
370	350	8.8	10.0	1.2	1.2	17.10
512	400	13.2	1.0	2.4	2.4	—
618	427	6.0	13.4	0.6	0.6	11.15

国外对于医疗废物的研究主要集中在收集、管理和评估其危害性方面, BYeongKYu Lee等人对收集到的一些医院及医疗机构的塑料类医疗废物^[17], 分析其回收潜力并提出了增加回收的方法。Yong-Chul Jang分析了韩国当前的一些医疗垃圾处理措施^[18], 指出热解焚烧是2005年以后最优的最可被接受的选择。

鉴于热重法不能考虑传热和流动及反应之间的相互影响等明显的局限性, 有必要对较大物料量进行深入详细的研究, 分析物料特性、热解条件对产物的影响规律, 寻求医疗废物热解焚烧处理的最优的工况。

4 数值模拟

焚烧炉内的稳定运行是优化焚烧炉的一个重要方面, 但由于炉内有一系列复杂的化学反应, 加上流动、传质、传热, 及试验手段和测试手段的局限, 使得对整个热解焚烧过程的认识变得尤为困难, 借助于CFD得到物料层内气流速度、温度、组分浓度和其它一些变量的详细分布信息, 可以更好地理解焚烧过程, 优化设计和运行参数。目前, 针对医疗垃圾的模拟还很少, 但已经有一些对于固体废物热分解的模拟, 按照建模对象可分为单颗粒模型和固定床层模型。

为了深入了解固体燃料的热降解过程, 许多学者对单个颗粒的热解过程进行了实验和理论研究。D L PYLE等人发展了一种新的定义控制颗粒热解速率参数的理论^[19], 提出了热解的4个简单实用的热力学模型, 包括一般模型、外部传递控制的模型、动力学控制的模型和内部传热控制的

模型, 提出2个热解数并以判断每个模型的适用条件, 从而简化热解模型。B Benkoussas基于热厚性假设模拟了木材的热降解行为^[20], 认为颗粒的尺寸及形状能影响热解行为, 随着颗粒尺寸的增加, 热扩散的特征时间变短, 热解受热扩散控制。Anup Kumar Sadhukhan建立了完整的瞬态模型^[21], 耦合了包含两级热解反应的动力学模型和包含扩散、对流和辐射模型的传热模型。模型预测的温度和失重过程与实验结果吻合很好。

在固定床层模型方面, D Shi等人建立了一维固定床模型^[22], 考虑气固两相间的热质交换及床层物理参数(床高、表面积)的改变。模拟分析了进气速率、固体燃料的热值、颗粒尺寸对火焰传播速度的影响, 但是对床层空隙率和焦炭反应的面积因子都设为常数, 有待改进。H Zhou建立了一维非稳态各向异性数学模型^[23], 模型给出了火焰锋面结构的详细信息, 在不同操作条件下, 床表面模拟气体组分浓度、点火面速率和床层温度的模拟与试验值吻合很好。Bas基于Darcy定律^[24], 模拟了麦秆固定床热解焚烧的过程, 模型把固体颗粒相看做连续介质, 并且认为颗粒一维、体积不变, 模拟考察了热解气体温度以及热解气固比对热解过程的影响。Y B Yang同样把整个床层看做连续介质^[25], 对固定床上燃料的燃烧进行了数值研究, 结合挥发分与空气的混合模型详细考察了挥发分的燃烧。此外, 还考虑了物料质量减少引起的床层运动。以上这些学者的研究都是把把固体相处理为一种连续介质, 同气相进行热质交换, 固相对于气相的作用使用达西定律

考虑。

从现有的模型来看, 一方面, 由于缺乏对真实传热传质及复杂反应过程的了解, 模型中做了很多假设, 因此需要更加接近真实情况地了解并描述床层内部传热传质及反应过程, 向真实化的方向发展; 另一方面, 从实际应用的角度讲, 建立直接针对医疗固废的统一的模型进行热解焚烧模拟也是以后发展的方向。

5 结 论

随着研究的深入, 医疗废弃物热解焚烧方式不断完善, 推动了医疗废弃物处理向着减量化、无害化、资源化进一步迈进。但在热解焚烧系统实际运行中, 热解炉的稳定运行还主要依赖于辅助燃料的调节, 这样就增加了系统波动的风险和大量辅助燃料的投入, 不利于提高经济效益。今后应该从以下几个方面开展细致的工作:

(1) 借助于质谱、色谱与热重分析仪联用, 得到热解产物的详细信息, 分析医疗废物不同组分之间的相互影响及机理, 尤其是空气氛下的热动力学参数。

(2) 考虑到热重法的局限性, 对较大物料量进行深入详细的研究, 分析物料特性、热解条件对医疗废物热解焚烧过程的影响规律, 寻求医疗废物热解焚烧处理的最优的工况。

(3) 在数值模拟方面, 可以尝试把单颗粒热解模型引入固定床层模型, 建立针对医疗废物的统一数学模型, 随着模型的完善和计算机处理能力的提高, 数值模拟在热解焚烧技术优化方面的作用将会越来越明显。

参考文献:

- [1] 2005 HJ/T177. 医疗废物集中焚烧处置工程建设技术规范[S].
- [2] HHABOD QFEIH QIW et al Hazardous waste generation and management in China: A review[J]. Journal of Hazardous Materials 2008 158: 221—227
- [3] YONG CHUL J CARGRO L OH SUB Y et al Medical waste management in Korea[J]. Journal of Environmental Management 2006 80: 107—115.
- [4] 李 剑. 医疗废物中典型有机质的热重分析[J]. 电站系统工程, 2004 20(4): 16—18.
- [5] 王玉如, 白广彬, 白庆中. 北京市医疗废物典型可燃组分的物化特性研究[J]. 环境工程学报, 2007 1(4): 115—118
- [6] 卿 山, 王 华, 吴桢芬, 等. 医疗废物燃烧过程动力学研究[J]. 燃烧科学与技术 2006 5(5): 457—462
- [7] 孙振鹏. 医疗垃圾典型组分热解和气化的实验研究[J]. 电站系统工程, 2005 21(5): 13—18.
- [8] 王玉如, 白广彬, 白庆中. 模拟医疗废物在 TG-DTA-FTIR 上的热失重特性研究[J]. 环境科学, 2007 28(7): 1637—1643.
- [9] 祝红梅, 将旭光, 池 涌, 等. 热重红外联用分析医疗垃圾的热动力学特性[J]. 工程热物理学报, 2008 29(3): 519—522
- [10] 王乔力, 张于峰, 马洪亭, 等. 医疗垃圾的热解特性[J]. 环境卫生工程, 2006 14(3): 40—42
- [11] 邓 娜, 张于峰, 马洪亭. 医疗废物中输液管(含 PVC)与纱布(含纤维素)的混合热解特性[J]. 天津大学学报, 2007 40(11): 1372—1376
- [12] 李 剑. 医疗废物中有机质的热解动力学研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005 6(7): 25—28
- [13] ZHU H M YAN J H XIANG X G et al Study on pyrolysis of typical medical waste materials by using TG-FTIR analysis[J]. Journal of Hazardous Materials 2008 153: 670—676
- [14] YANG Y B HIAN A N RYU C et al Mathematical modeling of slow pyrolysis of segregated solid wastes in a packed-bed pyrolyser[J]. Fuel 2007 86(1—2): 169—180
- [15] 李东红, 冯 涛, 祁国恕, 等. 城市医疗垃圾热解焚烧技术研究[J]. 环境卫生工程, 2004 9(3): 109—111
- [16] JANGSAWANG W FUNGTAMMASAN B KERDSUWAN S Effects of operating parameters on the combustion of medical waste in a controlled air incinerator[J]. Energy Conversion & Management 2005 46: 3137—3149.
- [17] BYEONG K L MICHAEL J E RAFAEL M E Analyses of the recycling potential of medical plastic wastes[J]. Waste Management 2002 22: 461—470
- [18] YONG C J CARGRO L OH S Y et al Medical waste management in Korea[J]. Journal of Environmental Management 2006 80: 107—115.
- [19] PYLE D L ZAROR C A Heat transfer and kinetics in the low temperature pyrolysis of solids[J]. Chemical Engineering Science 1984 39(1): 147—158.
- [20] BENKOUSSAS B CONSALVI J L FORTER E B et al Modelling thermal degradation of woody fuel particles[J]. International Journal of Thermal Sciences 2007 46: 319—327
- [21] SADHUKHAN A K GUPTA P SAHAR K Modelling and experimental studies on pyrolysis of biomass particles[J]. J Anal Appl Pyrolysis 2008 84: 183—192
- [22] SHIN D CHOIS S The combustion of simulated waste particles in a fixed bed[J]. Combustion And Flame 2000 124: 167—180
- [23] ZHOU H JENSEN A D GLARBORG P et al Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed[J]. Fuel 2005 84(4): 389—403.
- [24] BLASIC D BRANCA C TEISLEV B Development of a novel reactor for the oxidative degradation of straw[J]. Bioresource Technology 2004 94: 263—271
- [25] YANG Y B GOH Y R ZAKARIA R et al Mathematical modeling of MSW incineration on a travelling bed[J]. Waste Manage 2002 22: 369—380

(编辑 辉)

新技术、新工艺

过热蒸汽温度调节质量对过热器金属使用寿命的影响

据《Энергетика》2009年7~8月号报道,白俄罗斯国立技术大学 Кулаков ГТ 博士、教授和他的研究生研究了过热蒸汽温度调节质量的变化对过热器金属使用寿命的影响。

研究表明,借助于改进调节质量改变了锅炉蒸汽过热器金属的工作条件,明显增加了蒸汽过热器受热面的使用寿命。

ТИП-314型锅炉装置过热蒸汽温度喷水调节从手动控制转变到典型的 CAP(自动调节系统)控制,在30%负荷时,12X MΦCP 号钢的使用寿命能增加 3.48年,12X MΦ 号钢的使用寿命能增加 1.96年。

与典型的 CAP比较,应用改进的 CAP即使在 30%负荷下也能增加蒸汽过热器金属的使用寿命;在 100%负荷下,12X MΦCP 号钢增加 2.21年,12X MΦ 号钢增加 0.91年。

(吉桂明 摘译)

旋转状态下燃气涡轮叶片内部冷却的研究进展 = Recent Advances in the Study of Inner Cooling of Gas Turbine Blades in a Rotating State [刊, 汉] / DAIPing (College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, China, Post Code: 266061), LN Feng (CSC (China Shipbuilding Industrial Corporation) Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(4). — 363 ~ 368

In modern high-performance gas turbine engines with gas temperatures before turbines ever increasing, the rotating turbine blade cooling problem has received growing and unremitting attention. Among numerous cooling technologies, the inner cooling enjoys a conspicuous edge and relatively brilliant prospects for engineering applications. A survey of recent research results concerning the gas turbine blade inner cooling technologies in the rotating state was given. Summarized were the recent research findings regarding the influence of smooth wall surface rotation on the flow field and heat transfer, the influence of rotation on impingement cooling as well as the heat transfer of cooling media in the passages formed by turbulent rotation-flow type ribs. The advances in the study of the mutual influence of inner and air film cooling in a rotating state were described. Finally, it should be noted that the further optimization of inner flow passage structures, the influence of the rotation on the flow and heat transfer in the turbulent flow column passages and the in-depth exploration of the mechanism governing the mutual influence of inner flow and external air film cooling will be the focal point of future studies. Key words: gas turbine; cooling blade; inner flow; cooling; convection; heat transfer; rib; rotation

医疗废物热解焚烧处理研究 = A Survey of Medical Waste Pyrolysis and Incineration Treatment [刊, 汉] / MENG Qingmin, CHEN Xiaoping (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(4). — 369 ~ 373

Nowadays, the study on medical waste pyrolysis and incineration technologies is mainly focused on the aspect of thermodynamics, including an analysis of the pyrolysis process and influencing factors, as well as the establishment of a dynamic model with an even higher precision. From such aspects as physicochemical characteristics of medical wastes, dynamic characteristics of reactions in the pyrolysis and incineration process, miniature test scale study and numerical simulation etc., described were the recent advances in the study of medical waste pyrolysis and incineration treatment technologies. It should also be noted that the law governing the influence of material characteristics and pyrolysis and incineration conditions obtained from a fixed bed test stand on the above process in a relatively large quantity of materials and establishment of a material bed layer model involving a single particle model will be the problems to be solved further in future studies. Key words: medical waste; pyrolysis; incineration; physicochemical characteristics; numerical model

天然气长输管道燃压机组的机型选择及配置 = Machine Type Selection and Configuration for the Gas Turbine/compressor Unit of a Natural Gas Long-distance Transmission Pipeline [刊, 汉] / GAO Shunhua (China Petroleum West & East Gas Transmission Pipeline Company, Shanghai, China, Post Code: 200122), CHEN Renhui (China Petroleum Tarim Oil Field Sub-company, China, Post Code:) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(4). — 374 ~ 376

During the construction of a natural gas long-distance transmission pipeline, gas turbine type selection for a gas turbine/compressor unit and rational configuration of the number of units are very important. The current status of the units in the gas turbine-driven stations of the west & east gas transmission front line project was described. The "1+1" and "2+0" or "2+1" configuration methods of 38 light type gas turbines having a unit power output of about 30 MW were analyzed and the existing problems pointed out. The analytic results show that under the condi-