

基于 ANSYS Fluent 系统的炉排炉 垃圾焚烧过程数值模拟

马 剑

(天津泰达环保有限公司, 天津 300350)

摘要:为系统深入地研究机械炉排式垃圾焚烧炉内的焚烧特性,利用 ANSYS Fluent 软件进行了炉排炉内垃圾焚烧特性的数值模拟,模拟结果与实际运行数据基本一致。在此基础上,对炉排运行速度、进料含水率及助燃风含氧量等关键燃烧特性参数对垃圾焚烧过程的影响规律进行了模拟研究。

关键词:机械炉排;CFD;垃圾焚烧;富氧

中图分类号:X705

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2014)02-0026-05

NUMERICAL SIMULATION OF THE MECHANICAL GRATE GARBAGE INCINERATOR SYSTEM BASED ON ANSYS FLUENT

Ma Jian

(Tianjin teda environmental protection CO., Ltd., Tianjin, 300350, China)

Abstract:To further research burning characteristics of the mechanical grate garbage incinerator, ANSYS Fluent was used to simulate the characteristics of the waste incineration furnace grate, simulation results consistent with the actual operating data. On this basis, the effect of grate speed, the moisture content of feed and oxygen contents of combustion air on waste incineration process was studied.

Keywords: mechanical grate ; CFD ; waste incineration; oxygen-enriched

随着国内垃圾焚烧厂的大量建设运营,机械炉排式垃圾焚烧炉由于其具有入炉垃圾不需要分拣,可焚烧低热值高水分垃圾及单台炉处理容量大等优点而获得广泛应用。由于炉排炉内部结构复杂,运行操作繁复,我国相关系统的设计、应用水平与发达国家差距较大,千吨级及以上垃圾焚烧厂均要依赖国外进口,企业财务负担沉重。对于炉排炉,进行工程实验研究需要耗费大量的人力、物力,且受限于测量条件和安全考虑,往往只能获得炉内局部点的信息,不便于对其进行结构改造

与消化吸收。

计算流体力学(Computational Fluid Dynamic, CFD)作为一种先进的计算机辅助工具,经过近几十年的发展,已经成为解决粘性流体流动问题的重要手段,被广泛应用于航空航天、车辆工程、大气环境、传热以及化学反应等各工业领域的工程研究上,其中以 ANSYS Fluent 软件的 CFD 应用最为广泛^[1]。目前,国内已将 CFD 技术应用在部分垃圾焚烧炉的工程实验和设备改造方面^[2,3],但针对机械炉排式垃圾焚烧炉内的焚烧特性研究仍相对较少,缺乏系统完整的研究资料。因此,开展 CFD 技术在机械炉排垃圾焚烧炉上的模拟分析,将简化其工程实验过程,为深入研究炉内的垃圾

燃烧传热和烟气流动特性提供便利。

本文利用 ANSYS Fluent 软件模拟炉排与炉膛中的固相与气相燃烧特征并预测烟气主要成分,之后将预测结果与实地测量值相比较以验证模型正确性。在此基础上,对炉排运行速度、进料含水率及助燃风含氧量等关键燃烧特性参数对垃圾焚烧过程的影响规律特性进行了模拟研究,以期对相关系统的消化吸收与升级改造奠定基础。

1 模拟方法与条件

1.1 模拟方法

根据炉排炉的床层主要为固相燃烧而床层上方主要为气相燃烧的特点,采用分块模拟的计算方法,即先计算垃圾料层的固相燃烧,将计算结果作为入口边界条件,再进行气相燃烧传热计算。

1.2 垃圾焚烧炉

以某城市中心区生活垃圾焚烧处理项目所设计安装的 500 t/d 炉排式垃圾焚烧炉为实际物理模型,其型式为单锅筒自然循环水管锅炉,采用卧式和室内布置。模拟过程中所用到的数据为标准垃圾在平稳运行状态下 2 h 的平均运行数据。焚烧过程的生活垃圾理化特性分析见表 1。焚烧炉示意图如图 1 所示,其中炉排长 15.23m,宽 7.77m,倾斜角 15°。

表 1 生活垃圾理化特性

名称	标准垃圾	低质垃圾	高质垃圾	
设计参数	密度	0.4	0.6	0.3
	灰分	16.77	18.67	14.67
	水分	50.20	60.15	44.0
	可燃成分	33.03	21.18	41.33
	低位热值	6700	4186	8372
元素成分	C	18.12	11.97	23.96
	H	2.69	1.96	2.89
	O	10.57	5.57	12.77
	S	0.15	0.13	0.19
	N	1.18	1.25	1.18
	CL	0.32	0.31	0.34

注:密度单位为 t/m³,低位热值 kj/kg,其余均为%。

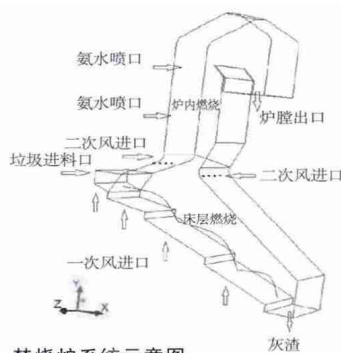


图 1 焚烧炉系统示意图

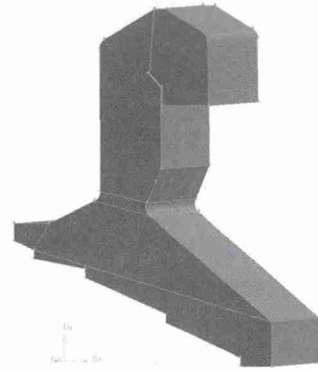


图 2 三维物理模型

对于床层的固相燃烧和燃烧室内的气相燃烧采用 Gambit2.4.6 建立三维立体模型,物理模型如图 2 所示,对床层气相入口部分、二次风喷嘴和燃尽风喷嘴等参数变化梯度较大的区域进行局部的网格加密,网格划分时,单元采用 Tet/Hybrid,类型采用 Tgrid,整个模型总网格数约为 154.16 万个。

1.3 初始和边界条件

在炉排入口处,垃圾料层初始厚度为 600 mm,初始孔隙率为 0.643,垃圾的供入量为 500 t/d。为简化计算过程,基于元素质量守恒和能量守恒原则,将城市生活垃圾焚烧产物简化假设为 CH₄、CO、H₂、CO₂ 和 H₂O,忽略 S、CL 等微量元素产生的污染物影响。二次风和燃尽风的输入采用速度进口边界条件,烟道出口采用出口流动边界条件,焚烧炉的燃烧室壁面设置为绝热,炉墙四周均布置有水冷壁,模拟计算时采用定壁温边界条件近似处理。各壁面温度设置见表 2。

表 2 壁面温度设置

	前墙	后墙	水冷壁	二次进风口	侧墙
温度/K	433	1300	800	300	800

1.4 数值计算模型

二维床层燃烧采用有限速率的非预混燃烧模型。燃烧室内的气相燃烧和辐射采用 ANSYS FLUENT V14.5 进行模拟,湍流模型采用标准 k-ε 模型,辐射模型采用 P-1 辐射模型,配合灰度气体质量加权求和方法求解混合气体的吸收系统,湍流-化学反应相干模型采用有限速率/涡耗散化学反应模型,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法进行求解。床层内和床层外互相提供计算结果作为边界条件,床内数值模拟提供气体温度、速度和化学组分浓度,并作为床外数值模拟的边界条件;反之

床外数值模拟提供床层内模型顶部的辐射强度和温度的分布^[4],直到两个模型迭代收敛。

2 垃圾在炉排炉中的焚烧特性

2.1 床层燃烧

垃圾床层内温度分布如图3所示,床层高度随垃圾质量的减少而逐渐下降,并且由于挥发分的燃烧及空气供应量的减少,沿着炉排长度方向,火焰温度逐渐降低。

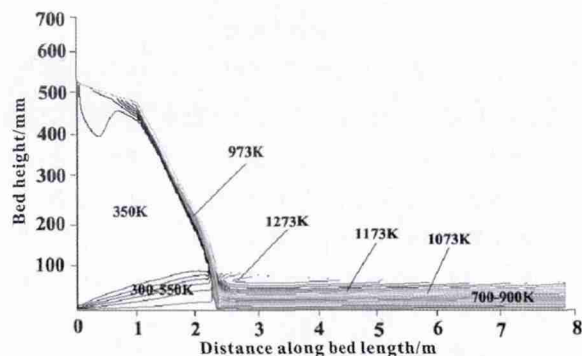


图3 床层垃圾燃烧温度分布

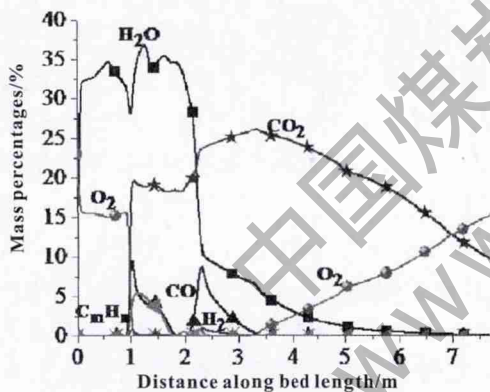


图4 床层顶部的气体组成

图4为垃圾在床层焚烧后产生的气体组成情况,由图可知,在沿炉排长度方向2.3m处,由于床层外辐射热使床层上垃圾的温度快速升高,垃圾中水分含量从35%急剧下降到小于10%;在沿炉排长度方向距进料口1m处,氧气浓度从23%下降到1%,在余下的炉排长度上保持氧气浓度为0,表明该燃烧过程为富燃料型燃烧状态;在沿炉排长度方向1m处,CO₂浓度从0急剧升高至20%,这种气体浓度的急剧变化是由床层中的沟流现象及连续较大的变化引起的。

2.2 燃烧室气相燃烧

燃烧室中心截面的温度分布如图5所示,当燃烧火焰出现在床层时,最高温度达到约1500K。

烟气继续往上流动时,由于水冷壁的吸热,其温度有所降低。随着来自前后墙的二次风的加入,未燃尽气体再次与氧气发生反应,温度也再次升高,此时最高温度达到1351K,且前墙上再燃火焰沿墙面爬升,造成前墙温度较后墙高。

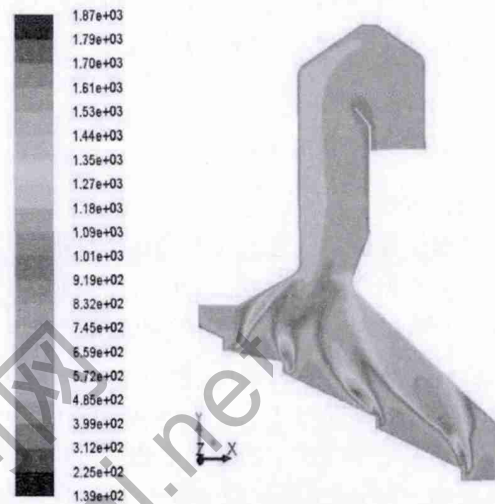


图5 燃烧室中心截面温度分布

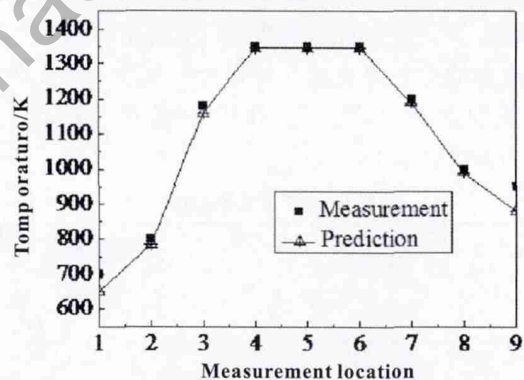


图6 温度预测结果与实测值比较

图6为炉内第一烟道测温位置的温度预测值与实际测量值的比较,图中可以看出,预测值与实际测量值的变化趋势基本一致;表2为炉膛出口位置烟气成分的预测值与实际值比较,由表中可以看出,两者之间误差均在3%~5%。因此得出结论,利用ANSYS Fluent软件模拟的炉排炉垃圾焚烧特征与实际运行状况基本相符。

表2 炉膛出口烟气成分预测值与实际值比较

	CO 浓度 /ppm	NO _x 浓度 /ppm	O ₂ 含量 /%	CO ₂ 含量 /%	H ₂ O 含量 /%
预测值	210	257	7.12	7.83	21.64
实际值	203	246	6.86	7.45	20.80
误差/%	3.5	4.4	3.7	4.8	3.9

3 影响垃圾焚烧过程的因素分析

3.1 炉排运动速度对垃圾焚烧的影响

炉排运动速度对垃圾的充分燃烧具有很大影响,如果炉排运动速度过慢,会导致床层过高,燃烧不充分;而炉排运动速度过快,则会导致垃圾迅速燃尽,从而让炉排暴露在高温环境下引起高温腐蚀^[5]。图 7 和图 8 所示为不同炉排运动速度下的沿床层长度方向的挥发分和烟气温度。

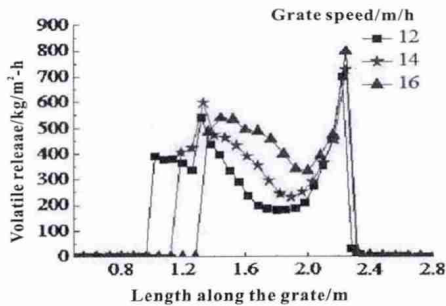


图 7 炉排运动速度对挥发分析出的影响

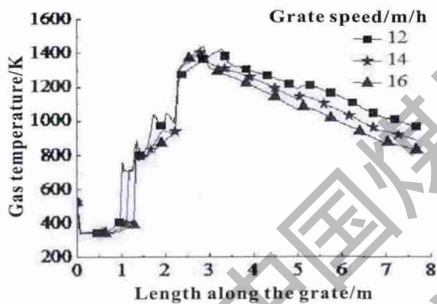


图 8 炉排运动速度对烟气温度的影响

从图 7 挥发分析出中可以看出,不同的炉排运动速度导致挥发分初始析出位置不同;炉排运动速度越快,挥发分析出位置离燃烧入口越远。当炉排运动速度为 12 m/h 时,挥发分析出位置距燃料入口 0.96 m;而炉排运动速度为 14 m/h 和 16 m/h 时,挥发分析出位置分别距燃料入口 1.1 m 和 1.3 m。挥发分析出速率随着炉排运动速度的增加而增加,最大值分布在 700~800 kg/m²·h 之间。

从图 8 燃料床层顶部温度可以看出,缓慢的炉排运动速度可以保证固定碳燃烧所需的足够的氧气,所以较慢炉排上部气体的温度高于较快运动速度的炉排,在炉排末端,最大烟气温度偏差达 200 K。

3.2 不同含水率对垃圾焚烧的影响

图 9 和图 10 所示为不同含水率下沿床层长度方向的挥发分和烟气温度。

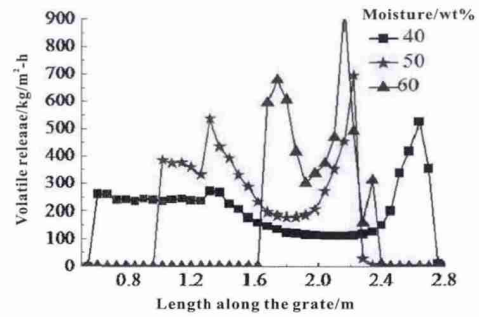


图 9 不同含水率对挥发分析出的影响

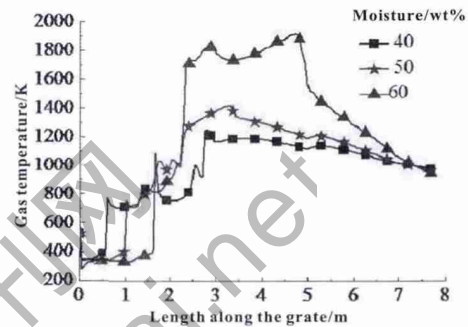


图 10 不同含水率对烟气温度的影响

从图 9 挥发分析出可以看出,由于不同含水率的垃圾水分干燥完成时间不同,导致挥发分析出位置不同,含水率越高,挥发分析出位置距燃料入口越远。当含水率为 40 % 时,挥发分析出位置跟燃料入口 0.6 m;而含水率为 50 % 和 60 % 时,挥发分析出位置跟燃料入口分别为 1.02 m 和 1.68 m。挥发分析出速率随着垃圾含水率的增加而增加,最大值分别在 500~900 kg/m²·h 之间。挥发分完成位置也不同,含水率为 40 % 与含水率 60 % 的挥发分挥发完毕时间晚 0.4 m。

由图 10 燃料床层顶部温度可以看出,含水率越高床层表面烟气温度越高,最大烟气温度偏差达 600 K。

3.3 助燃风含氧量对垃圾焚烧的影响

富氧燃烧具有减少燃烧过程的能量损失和降低有机污染物排放的优点^[6],图 11 和图 12 是通过改变一次风的含氧量(从 21 % 到 45 %),定量分析氧气含量对于垃圾燃烧特性的影响。图 11 所示为不同氧气气氛下,沿床层长度方向燃料的质量减少率。由图可以看出,质量减少率与床层长度在 2 m 前成大致的线性关系,当氧气浓度为 21 % 时,在炉排长度 2.4 m 处垃圾完成燃烧;而当氧气浓度为 45 % 时,在炉排长度 1.8 m 处就已完成燃

烧, 氧气浓度不同造成的燃烧点不同的偏差小于1m, 该偏差会影响燃烧室内的继续燃烧与辐射。

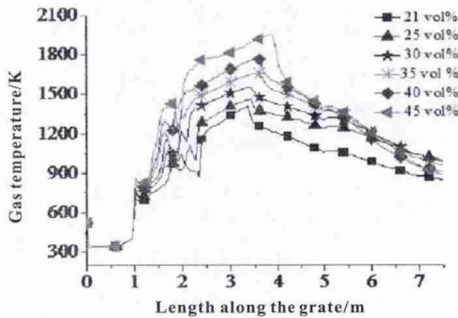


图 11 不同氧气气氛下燃料减少量

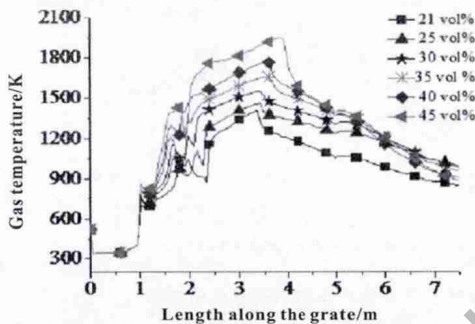


图 12 不同氧气气氛下床层顶部温度变化

图 12 为不同氧气气氛下床层顶部温度变化, 从图中可以看出, 在挥发分析出前, 氧气浓度对气体温度的影响很小, 气体温度在沿炉排长度方向 1.2 m 处开始变化。分析温度不同的原因, 主要是由于充足的氧气促进了固定碳的燃烧固, 加剧气体温度的提高, 最大的气体温度差达 500 K。

4 结论

(1) 利用 Fluent 软件, 设定有效边界初始条

(上接第 39 页)

mg/l 降至 10 mg/l, COD 由原来的 884 mg/l 降至 ≤ 50mg/l, NH₃-N 由原来的 141 mg/l 降至 ≤ 5 mg/l。

可节约排污费约 35 万元。从集团公司供水管网引进的水每吨为 3.5 元, 经生活污水处理厂处理后的回用水代替集团公司供自来水, 每年可节约 182.5 万元。

6 结束语

生活污水既是一种污染源, 也是一种水资源, 生活污水净化处理具有一定的经济效益和环境效益。随着社会不断发展, 水资源必将成为企业发展

件, 采用有限速率的非预混燃烧模型, 对机械炉排式垃圾焚烧炉内垃圾的固相燃烧和气相燃烧进行模拟, 模拟结果显示: 模拟数据与实际运行数据基本一致。

(2) 基于所建立的 CFD 模型, 针对不同炉排运动速度、垃圾含水率及助燃风含氧量等关键焚烧参数对垃圾焚烧特性的影响进行了模拟分析, 结果表明: 当炉排运动速度为 12m/h、14m/h 和 16m/h 时, 挥发分开始析出位置分别距燃料入口 0.96m、1.1m 和 1.3m, 炉排末端的最大温度差为 200K; 垃圾含水率越高, 挥发分开始析出的位置距燃料入口越远, 析出完毕距离越近, 且床层表面烟气温度越高, 最大烟气温度偏差达 600K; 与正常的焚烧气氛相比, 在富氧气氛下垃圾焚烧的质量减小率与炉排长度近似成线性关系, 床层顶部温度最大偏差达 500K。

参考文献

[1] 李晓东, 黄国权, 李爱民. 异重流化床垃圾焚烧技术的试验研究[J]. 动力工程, 1998, 18(6): 21-25.

[2] 张卫. CFD 在大容量垃圾焚烧炉优化设计中的应用[J]. 工业炉, 2009, 31(2): 39-41.

[3] 马晓茜, 刘国辉, 余昭胜. 基于 CFD 的城市生活垃圾焚烧炉燃烧优化[J]. 能源研究与利用, 2008, 36(2): 101-106.

[4] 赵颖, 刘富强, 聂永丰. 运用 CFD 技术进行二段往复炉排焚烧炉二次风口的辅助设计[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(1): 132-135.

[5] YANG Y B, LIM C N, GOODFELLOW J, et al. A diffusion model for particle mixing in a packed bed of burning solids[J]. Fuel, 2005, 84: 213-225.

[6] 刘国辉, 马晓茜, 余昭胜. 利用 CFD 技术对城市生活垃圾富氧燃烧特性分析[J]. 热能动力工程, 2009, 24(2): 247-251.

的瓶颈。MBR 工艺处理煤矿生活污水可以大大减缓矿区用水的压力, 这对于提高居民生活质量和促进区域经济发展, 起到积极作用。具有非常好的经济效益、环境效益、社会效益。

参考文献

[1] 陈磊, 郭光. SBR 法在煤矿生活污水处理中的应用[J]. 煤炭工程, 2006, (01): 55-56.

[2] 尚少鹏, 赵玉伦. 煤矿生活污水处理模式探讨[J]. 煤炭工程, 2003, (10): 64-66.

[3] 郑俊, 吴浩汀. 曝气生物滤池工艺的理论及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.