

# 基于 Fluent 的一种生物质热解气体冷凝装置的设计

王述洋, 李麒 (东北林业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要** 热解气的冷凝液化是生物质快速热解制油工艺的关键技术之一, 增强高温生物质热解气的冷凝液化效果对于提高生物燃油的品质及产量非常重要。该研究在对热解气冷凝进行传热传质计算的基础上, 设计一种高效可靠的生物质热解气体冷凝装置, 并通过 Fluent 软件分析检验该装置的冷凝效果。

**关键词** 生物质热解气; Fluent; 冷凝液化

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)32-12696-03

## Design of a Cooling Unit about the Pyrolysis Gas of Biomass Based on Fluent

WANG Shu-yang et al (College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

**Abstract** It is the key technology that can condense and liquefy the gas in the fast pyrolysis of biomass industry. In order to upgrade the trait and yield of the bio-oil, it is necessary to reinforce the effectiveness of condensation and liquefaction of the pyrolysis gas of biomass. Based on the calculation of heat and mass transfer, a cooling unit which condenses the pyrolysis gas of biomass reliably was designed. The computational fluid dynamics code Fluent will be used to check the performance of this cooling unit.

**Key words** Pyrolysis gas of biomass; Fluent; Condensation and liquefaction

我国是一个石油储量相对不足的国家, 人均石油资源拥有量仅为世界平均水平的 1/10。根据当前的经济增长模式和计划发展目标估算, 预计到 2020 年我国石油缺口将扩至 4 亿 t 左右, 对外依存度高达 70%<sup>[1]</sup>。因此, 若不积极研究和开发石油替代品以扭转原油过度依赖进口的不利局面, 未来我国石油供应不足的问题必将成为约束国民经济增长的瓶颈。

生物燃油以废弃生物质为原料, 是一种应用范围广、可在多领域代替石油的新型可再生液体能源, 其生产成本显著低于相同热值下的石油, 具有很强的商业推广潜力。生物燃油还可与柴油按合适配比混合乳化, 制成清洁环保型“生物燃油+柴油”混合乳化燃料。试验表明, 这种混合乳化燃料可应用于普通柴油机, 在节约珍贵石油资源的同时又可减少温室气体的排放。生物质快速热解液化是制取生物燃油的有效方法, 其是指在常压、无氧以及超高加热速率等条件下, 将生物质固体粉末热裂解转变为含有大量可冷凝有机分子的高温气体, 这些气体若经有效方法冷凝, 便可获得高附加值的液体生物油。在这一转变过程中, 高温气体的冷凝效果是否理想对获得生物燃油品质的优劣有较大程度的影响。因此, 若能设计一款高效生物质热解气体冷凝器必将对实现生物质热解液化技术的商业化应用起到重要推动作用。

## 1 生物质热解气冷凝系统工艺设计

目前, 气体冷凝器主要分为两种类型, 一类是间壁式冷凝器, 另一类是混合式冷凝器。间壁式冷凝器的特点是冷、热流体被换热间壁隔开, 两者通过换热间壁进行热量传递; 混合式冷凝器是指冷、热两种流体直接接触, 彼此互相混合, 在传热的同时存在传质。混合式冷凝器避免了传热间壁及两侧污垢所形成的热阻, 只要流体间的接触状态良好, 就有较大的传热速率, 因此凡是允许冷、热流体相互混合的场合,

皆可采用混合式冷凝器<sup>[2-3]</sup>。根据生物质快速裂解液化化技术的工艺特点, 该研究采用混合式冷凝器作为整个冷凝系统的核心部件, 将常温下的生物燃油作为冷流体, 与快速裂解产生的高温气体直接混合, 这样可以大大增加冷凝过程中气液两相的接触面积, 使得热流体温度快速降到凝点以下, 强化冷凝效果。

该研究设计的生物质热解气冷凝系统主要由冷凝器、换热器、旋风分离器、缓冲罐、凉水塔、冷水池和液压泵等部件组成(图 1)。其工艺流程如下: 由热解反应器产生的高温裂解气从 A 口进入系统, 经旋风分离器将可能含有的生物质残渣与灰分分离并通过 B 口排出; 净化好的气体由 C 口进入冷凝器, 其中的不凝气冷却后经 D 口排出, 焦油、残碳等废料经沉降处理后由 F 口排出, 而液化后的生物燃油由 E 口进入缓冲罐, 在溢流作用下通过 G 口进入燃油集装系统等待后续工艺处理, 余下的生物燃油进入换热器与冷却水进行热交换并在液压泵的带动下作为冷流体进入冷凝器; 而载有残热的冷却水亦在液压泵的带动下经凉水塔散热降温后进入冷水池进一步降温并参加下一次换热作业。不难看出, 生物质热解气冷凝系统主要包含 3 次热量交换, 其一是热解气与低温生物燃油进行的热交换; 其二是升温后的生物燃油与冷却水进行的热交换; 其三是冷却水在凉水塔和冷水池中与周围空气等冷介质进行的热交换。笔者主要研究第一次热交换即在冷凝器中发生的热交换。

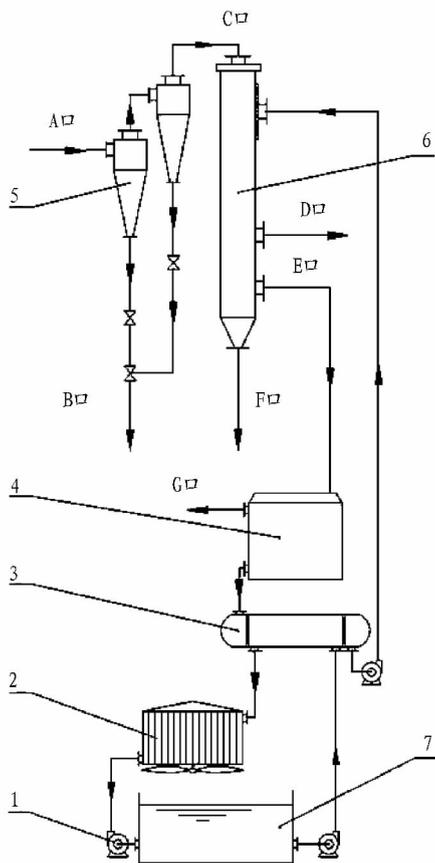
## 2 生物质热解气冷凝换热量及冷、热流体流量计算

笔者针对年产 1 万 t 生物燃油制取装备中配套冷凝器的冷凝换热量及冷、热流体流量进行设计计算。已知生物质热解气在进入冷凝器时温度  $T_1$  为 713 K, 冷流体初始温度  $t_1$  为 307 K, 流出温度  $t_2$  为 319 K, 冷凝后剩余的不凝气温度  $T_2$  为 321 K。热解气占生物质热解总产物的 73%, 其中不凝气含量为 23%, 可凝气含量为 50% (可凝气中含水 25%), 剩余产物为碳渣等, 占总量的 27%。

### 2.1 热流体流量计算 已知可凝气占生物质热解总产物的

**作者简介** 王述洋(1958-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士, 博士生导师, 从事新能源技术与装备研究。

**收稿日期** 2013-09-27



注:1. 液压泵;2. 凉水塔;3. 换热器;4. 缓冲罐;5. 旋风分离器;6. 冷凝器;7. 冷水池。

图1 生物质热解气冷凝系统

50%,若年产1万t生物燃油且一年按300d计算,则需要生物质原料的理论数值为 $10\,000 \div 50\% = 20\,000 \text{ t/a} = 0.771 \text{ kg/s}$ 。考虑实际工程中进料的便捷性以及应有的裕度需要,可将实际进料量圆整到 $1 \text{ kg/s}$ 。根据已知条件,不难算出最终实际进入冷凝器的热流体流量: $G_{\text{热流体}} = G_{\text{裂解气}} = G_{\text{可凝气}} + G_{\text{不凝气}} = (0.5 + 0.23) \times G_{\text{原料}} = 0.73 \times 1 = 0.73 \text{ kg/s}$ 。其中,可凝气(含水)流量为 $G_{\text{可凝气}} = 1 \times 50\% = 0.5 \text{ kg/s} = 1\,800 \text{ kg/h}$ ;不凝气流量为 $G_{\text{不凝气}} = 1 \times 23\% = 0.23 \text{ kg/s} = 828 \text{ kg/h}$ ;水蒸气流量为 $G_{\text{水}} = G_{\text{可凝气}} \times 25\% = 0.5 \times 0.25 = 0.125 \text{ kg/s} = 450 \text{ kg/h}$ 。

**2.2 冷凝换热量及冷流体流量计算** 由于生物质热解气是一种高温混合物,因此在计算其冷凝换热量时,应分别算出其中可凝气、不凝气以及水蒸气的换热量并将三者线性叠加起来。参考程文龙<sup>[4-5]</sup>等的研究成果,可以得到生物燃油在较高温度的平均比热 $C_{\text{热油}}$ 为 $3.42 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,在室温下的平均比热 $C_{\text{冷油}}$ 为 $2.65 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,可凝气定压比热 $C_{\text{可凝气}}$ 为 $2.067 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,不凝气定压比热 $C_{\text{不凝气}}$ 为 $1.083 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,可凝气的凝点 $T_{\text{油}}$ 为 $473 \text{ K}$ ,相变潜热 $\Delta H_{\text{油}}$ 为 $667 \text{ kJ/kg}$ ;查阅《化工原理》<sup>[6]</sup>可知,水蒸气的定压比热 $C_{\text{水蒸气}}$ 为 $2.1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,液态水的比热 $C_{\text{水}}$ 为 $4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,凝点 $T_{\text{水}}$ 为 $373 \text{ K}$ ,相变潜热 $\Delta H_{\text{水}}$ 为 $2\,258 \text{ kJ/kg}$ 。综上所述,生物质热解气的冷凝换热量可按下式计算:

$$Q_{\text{冷换}} = Q_{\text{可凝气}} + Q_{\text{不凝气}} + Q_{\text{水蒸气}} \quad (1)$$

$$\text{式中, } Q_{\text{可凝气}} = G_{\text{可凝气}} [C_{\text{可凝气}} (T_1 - T_{\text{油}}) + \Delta H_{\text{油}} + C_{\text{热油}} (T_{\text{油}} - t_2)]$$

$$= 1\,350 \times [2.067 \times (713 - 473) + 667 + 3.42 \times (473 - 319)]$$

$$= 2\,281\,176 \text{ kJ/h}$$

$$Q_{\text{不凝气}} = G_{\text{不凝气}} C_{\text{不凝气}} (T_1 - T_2)$$

$$= 828 \times 1.083 \text{ kJ} \times (713 - 321)$$

$$= 351\,710.6 \text{ kJ/h}$$

$$Q_{\text{水蒸气}} = G_{\text{水蒸气}} [C_{\text{水蒸气}} (T_1 - T_{\text{水}}) + \Delta H_{\text{水}} + C_{\text{水}} (T_{\text{水}} - t_2)]$$

$$= 450 \times [(2.1 \times (713 - 373)) + 2\,258 + 4.18 \times (373 - 319)]$$

$$= 1\,438\,974 \text{ kJ/h}$$

故生物质热解气的冷凝换热量:

$$Q_{\text{冷换}} = 2\,281\,176 + 351\,710.6 + 1\,438\,974$$

$$= 4\,071\,860.6 \text{ kJ/h}$$

$$= 1\,131 \text{ kW}$$

在算得冷凝换热量的情况下,可以通过下式计算冷流体的流量:

$$G_{\text{冷流体}} = \frac{Q_{\text{冷换}}}{C_{\text{冷油}} (t_2 - t_1)}$$

$$= \frac{4\,071\,860.6}{2.65 \times (319 - 307)}$$

$$= 128\,046 \text{ kg/h}$$

$$\approx 36 \text{ kg/s}$$

### 3 混合式冷凝器结构的确定

该研究设计的混合式冷凝器结构如图2所示,冷、热流体分别从A和B口进入装置。由于热流体的温度高达 $713 \text{ K}$ ,在热流体冷凝液化的同时,亦有一定量的冷流体在吸收大量热后发生气化,因此在冷凝器内部流体的液化与气化是并存的,但最终会因为冷流体的流量远大于热流体,而将部分气化的冷流体和可凝的高温热解气冷凝下来并通过D口进入缓冲罐,不可凝的热解气则会冷却至工况温度并从C口排出。参考张德刚等<sup>[5,7-8]</sup>的研究成果,结合实际工程经验,初步确定冷凝器的直径 $D_{\text{冷}}$ 为 $1\,500 \text{ mm}$ ,冷凝器的总高 $H_{\text{冷}}$ 为 $6\,500 \text{ mm}$ ,A口的直径 $D_A$ 为 $207 \text{ mm}$ ,B口的直径 $D_B$ 为 $207 \text{ mm}$ ,C口的直径 $D_C$ 为 $300 \text{ mm}$ ,D口的直径 $D_D$ 为 $273 \text{ mm}$ 。

### 4 利用 Fluent 软件检验装置的冷凝效果

**4.1 三维模型的简化** 该研究内容属于多相流范畴。由于实际工况中冷凝器内含有不凝气,因此在设计冷凝器结构时考虑了其与生物燃油分离并排出的问题。在利用 Fluent 软件建立气液两相传热传质模型的过程中,如果按照现实的工况条件,考虑不凝气的分离排出问题,则会大大增加模型的复杂程度,运算规模会超出电脑的计算能力;同时考虑到建立模型的目的是检验装置的冷凝效果,因此,笔者把不凝气假设为可凝气当中的一部分,参与相变并能够和冷流体混合。这样既简化了模型,又不影响对装备冷凝效果的检验。简化后的冷凝器三维模型经 Gambit 前处理软件网格化分后

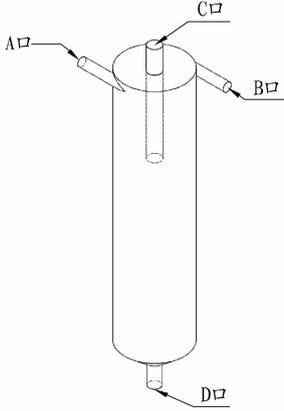


图2 冷凝器结构示意图

如图3所示。

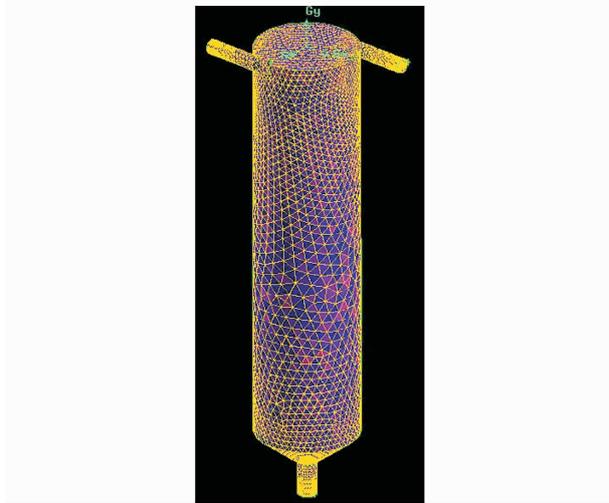


图3 简化并网格化后的冷凝器模型

**4.2 多相流模型的建立** 由于 Fluent 软件自带的多相流动混合模型目前还不能解决不同相之间的质量传递问题,因此需要使用自定义函数来定义气、液两相之间的传质模型。在目前已有的气液相变传质模型中, Lee<sup>[9]</sup> 提出的模型得到了最广泛的应用,其具体表达式:

气化过程:

$$\dot{m}_q = -\dot{m}_y = r\alpha_q\rho_y \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}}, T > T_{sat} \quad (2)$$

液化过程:

$$\dot{m}_y = -\dot{m}_q = r\alpha_q\rho_q \frac{T_{sat} - T}{T_{sat}}, T < T_{sat} \quad (3)$$

式中,  $\dot{m}_q$ 、 $\dot{m}_y$  分别为气液两相的相变率,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $r$  为控制相变强度因子,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\alpha_q$ 、 $\alpha_y$  分别为气液两相的体积分数, 无量纲量;  $\rho_q$ 、 $\rho_y$  分别为气液两相的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T_{sat}$  为饱和温度,  $\text{K}$ ;  $T$  为实际相温度,  $\text{K}$ 。

**4.3 仿真计算的冷凝效果** 根据公式(2)和(3), 可编写自定义函数并导入 Fluent 软件的计算模型中, 之后把冷凝器的网格文件载入软件中, 根据已知的温度条件和算得的流量条件设置软件中相应的边界条件, 在初始化参数并迭代 26465 步之后, 分别得到如图 4~6 所示的温度分布、液相体积分数

以及气液两相运动轨迹的计算结果。从图 4~6 可知, 设计的冷凝装置具有良好的冷凝效果。根据温度和液相云图不难发现, 冷凝器的下半部分温度场分布均匀且全部为液相, 因此可以对冷凝器的总高度作出适当缩短, 以节省材料和空间资源。

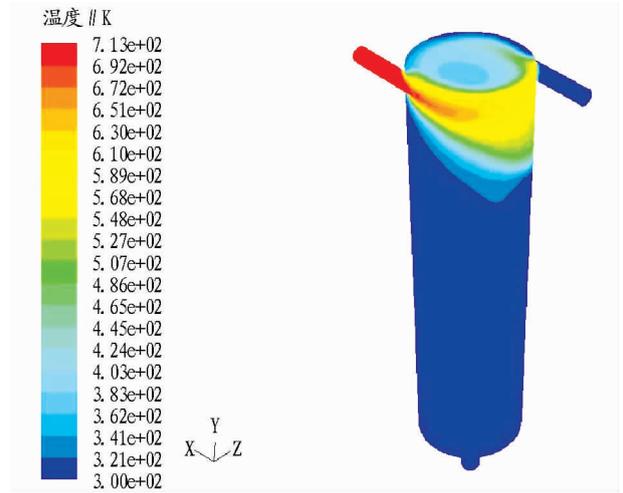


图4 冷凝器外壁温度云图

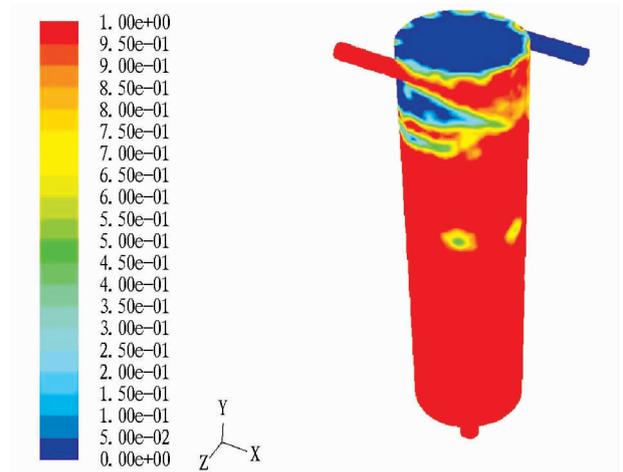


图5 冷凝器外壁液相体积分数云图

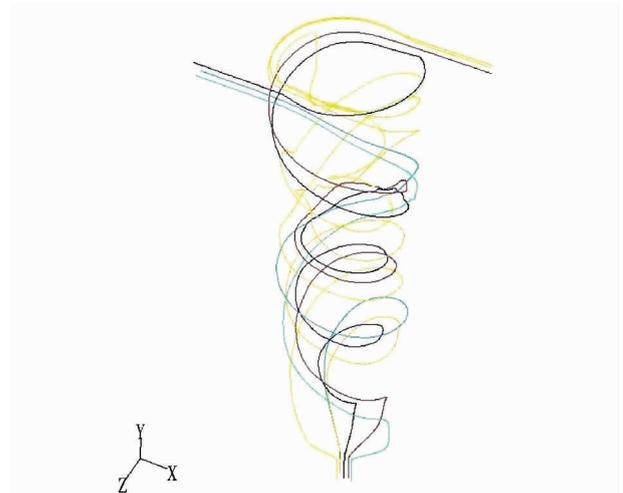


图6 冷凝器气液两相运动轨迹图

格范围内,但却开不起车来,而换个批次或换个厂家后就好用的现象。针对这类问题,在寻找机械设备自身存在的问题基础上,也应从材料本身寻找问题的根源。

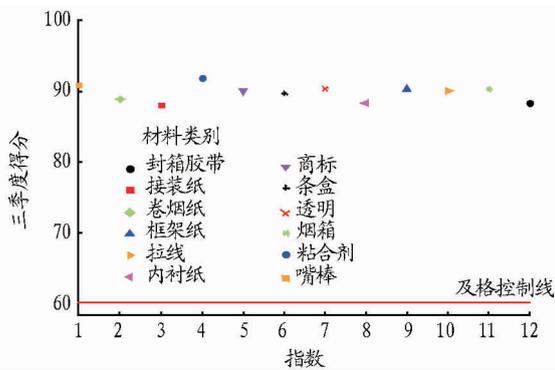


图3 辅料上机适用性调查的时间序列

表1 A与B的双样本T检验

样本	样本数	平均值	标准差	平均值 标准误	差值 置信区间	T值	P值
A	24	8.830	0.557	0.11	(-1.604, -7.97)	0.000	
B	24	10.110	0.557	0.11	-0.957)		

**2.1 基本要求** 卷烟辅助材料在进入卷烟厂各生产车间后,需派专人对材料的物料名称、物料代码、物料外观进行核对,保证正确使用材料。开始生产使用材料后,工艺人员、质量管理人员需定时进行巡查,及时了解材料在使用过程中的各类小问题,保证生产的连续性及效率。

**2.2 新辅助材料的小试、中试** 在材料进行工艺调整、设备更新、新技术应用、产品设计标准更改或进货检验发现存在小的质量问题,按照标准又不能进行退货时,需开展小批量上机试验,以确认是否与机械设备相适应,及时发现使用问题。

**2.3 问题处理** 辅助材料在使用过程中发现与生产机械不适应的问题时,联系生产厂家来人进行挑选、处理等,以保证生产的顺利进行。生产过程发现不合格材料时,联系物料供应部门进行调整,及时将不合格情况进行处理,对不合格材料进行就地销毁等,事后对材料供应厂也要进行处罚并要求其限期整改。

**2.4 现场记录** 辅助材料使用情况需进行现场调查,主要了解各供应厂提供的同规格材料存在哪些不同,在使用各厂

的材料时需注意哪些问题,是否存在外观差异等,并进行记录。

### 3 质量调查

多数卷烟厂的辅助材料质量管理人员均独立于生产车间,分属于质量管理部门或质量检测部门。这种职责划分导致其无法随时并完全真实地了解辅助材料与机械设备的适应方面以及在使用过程中还存在哪些具体的质量问题。为解决这个问题,需经常开展辅助材料质量上机适用性调查。从调查结果中,可以真实了解到卷烟辅助材料在车间使用过程中有哪些问题、存在什么样的缺陷,以及车间一线生产员工有怎样的改进意见或建议。同时,还可以从质量调查中寻找改进辅助材料质量的突破口,以一种更加有效、直接的方式找到辅助材料质量提升的方向。

### 4 质量问题沟通

在过去的辅助材料质量管理中,通常是出现质量问题后由质量管理部门反馈至物流供应部门,再通过物流供应部门反馈至供应商。这种单向的质量技术反馈有时无法达到预期的效果,甚至出现部分质量问题不能解决的现象。为保证质量问题第一时间得到有效解决,对原有的管理模式进行调整,在卷烟厂的辅助材料质量管理部门与供应商及生产车间之间形成多向沟通机制,由质量管理部门及时了解车间生产时卷烟辅材相关问题,并及时反馈至供应商。同时,对于辅助材料的质量改进采用技术合作方式进行,以“合作共赢”的态度面对辅助材料的全面质量提升工作。具体工作主要有:专项辅助材料质量提升,专项技术指标研究,质量问题沟通、处理、分析、整改、跟踪验证闭环机制,技术革新项目机制等。

### 5 结语

烟草企业对于烟用辅助材料质量的关注度正在逐步提升,而辅助材料与烟用机械设备的适应性能是一个主要的关注焦点。从质量控制技术及管理方式上共同监控卷烟辅助材料,可保证其质量稳定可靠,从而有效发挥高速卷烟设备的实际应用。

### 参考文献

- [1] 崔庆军,李维娜.浅谈卷烟辅助材料供应商管理[J].经济与管理,2004,18(11):94-96.
- [2] 胡晶.浅谈质量管理与质量意识[J].价值工程,2013,32(5):139-140.
- [3] 李敏.GB2828抽样检验方法在卷烟进货检验中的应用[J].河北烟草,2008(5):22-23.

(上接第12698页)

### 5 结语

笔者针对年产1万t生物燃油制取装备中配套冷凝器的冷凝换热量及冷、热流体流量进行设计计算,在此基础上设计了一款生物质热解气体冷凝装置,通过Fluent软件进行分析检验,证明该装置具有良好的冷凝效果。

### 参考文献

- [1] 王黎明,王述洋.柴油机燃用生物油/柴油乳化燃料的性能试验[J].农机化研究,2010(10):203-206.
- [2] 尾花英郎.热交换器设计手册[M].北京:轻工业出版社,1987.

- [3] 史美中,王中铮.热交换器原理与设计[M].南京:东南大学出版社,2009.
- [4] 程文龙,谢鲲,赵锐,等.生物油气液相平衡与比热容研究[J].工程热物理学报,2010,31(1):24-27.
- [5] 张德利.新型下降管生物质热裂解液化装置的设计及试验研究[D].淄博:山东理工大学,2012.
- [6] 杨祖荣.化工原理[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [7] MILOSAVLJEVIC N, HEILDDLA P. A comprehensive approach to cooling tower design[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21: 899-915.
- [8] 刘军云.直接接触式换热的实验研究[D].昆明:昆明理工大学,2012.
- [9] LEE W H. A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Flow Modeling [M]. Washington, USA: Hemisphere Publishing, 1980.