1月

2007年

Jan 2007

文章编号: 0253 - 9993 (2007) 01 - 0069 - 04

煤等离子热解制乙炔反应器结构优化模拟

杨巨生^{1,2},杨 燕¹,鲍卫仁²,张永发²,谢克昌²

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 煤科学与技术教育部和山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘 要:建立了等离子体反应器的热流场计算流体力学模型,将此模型应用于单入口、双入口及带保护气的双入口等离子反应器模拟,采用不完全乔勒斯基共轭梯度法对热流体耦合场进行求解,结果表明:采用双入口结构,可提高反应器负荷,在等离子反应器的等离子入口周边设置保护气可降低壁面结焦,当保护气的入口流速为 50 m/s左右时,效果较好.

关键词: 等离子体; 反应器; 优化; 模拟

中图分类号: TQ 530.2 文献标识码: A

Optim ization simulation of thermal plasma reactor for acetylene production from coal

YANG Ju-sheng^{1,2}, YANG Yan¹, BAO Wei-ren², ZHANG Yong-fa², X E Ke-chang²

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Key Laboratory of Coal Science and Technology, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The heat-flow field mathematical model based on Computational Fluid Dynamics (CFD) technique was developed for the thermal plasma reactor in order to optimize the reactor structure and operation conditions for the direct production of acetylene from coal. The simulation of thermal plasma reactor with single inlet, double inlet and double inlet with protective gas was given, simulations of heat-flow coupling field was carried out by using the method of Incomplete Cholesky Conjugate Gradient (ICCG). The optimization simulation results show that the load of thermal plasma reactor with double inlet is increased, and the reactor wall surface coking is depressed, the anti-coking effect is best under the gas flow rate 50 m/s

Key words: plasma; reactor, optimization; simulation

煤等离子热解制乙炔工艺是一种将煤喷入电弧等离子体中直接转化为乙炔的技术,具有流程简短、污染小的特点,是传统乙炔生产的替代工艺 [1]. 太原理工大学煤科学与技术教育部和山西省重点实验室建有国内惟一的煤在等离子体热解制乙炔试验装置,并正在进行系统优化,通过进行煤在等离子体热解制乙炔装置的结构优化模拟并进一步进行煤等离子体热解制乙炔装置的结构优化,解决反应器内结焦严重、连续稳定运行时间短、整体反应器效率偏低、负荷小等问题,为其产业化奠定基础.

1 煤等离子热解制乙炔工艺及反应器流程[2]

在已有研究的基础上,对煤等离子热解制乙炔反应器系统进行改进,以克服先前装置的缺陷,建设新

收稿日期: 2006-02-06 责任编辑: 柳玉柏

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目 (2005CB221202)

作者简介: 杨巨生 (1965 -), 男, 山西太原人, 副教授. Tel: 0351 - 6018676, E - mail: yangjusheng@tyut.edu.cn

的煤等离子热解制乙炔反应器 (图 1). 通 过煤等离子热解制乙炔反应器结构优化模 拟, 为结构选择、参数优化提供基础,

在图 1中,等离子发生器在通入工作气 体 (H₂ + Ar) 并施加电源后, 在等离子反应 器产生等离子体弧,天然气、煤粉及载气经 表面式换热器吸热后,由天然气喷管及煤粉 喷管喷入等离子反应器中, 在等离子反应器 中发生反应, 其生成物经淬冷器中由淬冷水 入口进入的给水对其进行快速冷却,再经过 对流式换热器放热进入气固分离器,分离出 的炭黑进入与外界起封闭作用的水槽中,分 离出的气体经气固分离器出口进入气体分离 器中,分离出产品气经气体分离器出口输出 储存、气体分离器分离出的氩气与氢气混合 后,循环进入等离子发生器中.

给水经等离子发生器冷却阴阳极,吸收 热量后的水流出,再引入对流式换热器中, 吸收热量后的 150~250 的蒸汽进入表面 式换热器,预热天然气及煤粉载气,表面式 换热器出口的 120~225 的蒸汽进行余热利用.

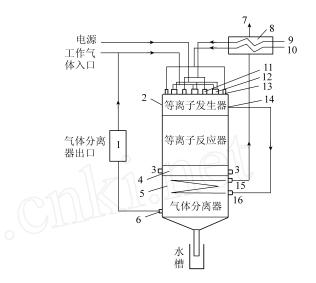


图 1 煤等离子体热解制乙炔装置系统

Fig. 1 Experimental flow chart of coal pyrolysis in arc plasma -气体分离器;2---循环冷却水套进口;3---淬冷水入口; 4——淬冷器: 5——水汽换热器: 6——气固分离器气体出口: —天然气管; 11——煤粉气流喷管; 12——等离子发生器入口; 13——天然气喷管; 14——循环冷却水套进口; 15—水汽换热器出口; 16—水汽换热器入口

煤在等离子反应器中热解制乙炔的过程中,3个主要的输入量为煤粉、电能和氢气,氢氩工作气体流 经阴阳电极间产生电离喷入等离子反应器,煤粉喷入电离高温等离子体发生短接触、超高温反应,生成乙 快混合气体,经淬冷及多相分离,分离出煤渣及混合产品气,再经过气体分离器进行分离,分离出的氩气 作为保护气、工作气进行再循环, 乙炔产品气送入储藏罐.

2 煤在等离子反应器中热解过程的热流场模型及模拟

2.1 煤在等离子反应器中热解过程的热流场特性、边界条件及物性参数

2.1.1 煤在等离子反应器中热解过程的热流场特性

鉴于热等离子体处于超高温下 (3 000~10 000 K),目前还没有方便、准确的测量手段,采用接触式 测量,探头会直接破坏温度场及流场,非接触测量方法准确度难以保证[3]. 有些作者将内壁面温度设为 恒温,不符合具体热等离子反应器特征,我们曾对其热流场进行模拟,对温度场的边界条件在一些点实测 的基础上进行推测得知:反应器实际的热边界条件呈现强湍流的第3类边界条件。本文进一步从热等离子 反应器的实际过程出发,由控制方程的相似性可得出动量场与温度场的相似性,由传热学原理知,热等离 子体是光学薄的,即可忽略辐射换热过程,等离子体处于局域热力学平衡,即轻、重粒子的温度在所研究 的温度、压力范围内是相等的,忽略电场、磁场的作用,以及重力和由黏性引起的热量耗散,流动状况为 湍流,采用 Boussinesq的涡黏性概念和 k - 双方程湍流模型,热等离子反应器内高雷诺数的湍流热流动, 是以强制对流换热为主导的热过程,把常温湍流流动数值模拟中广泛应用的 k- 双方程模型推广用于大 温差、变物性的等离子体射流条件下,通过热等离子反应器动量场及速度矢量场的模拟可揭示其传质传热 讨程.

2.1.2 煤在等离子反应器中热解过程的热流场边界条件 煤在等离子反应器中热解过程的热流场边界条件如下: 热流场入口处 (z=0) 为

$$v_{\rm r} = v_{\rm b}$$
 (本文参数为 120 m/s);
 $v_{\rm r} = 0$; $t = t_{\rm b}$ (本文参数为 8 000 K).

热流场出口处为

$$\frac{\partial t}{\partial z} = 0; \frac{\partial v}{\partial z} = 0; v_{\rm r} = 0;$$

热流场壁面处为

$$v_z = 0$$
; $v_r = 0$

2.2 煤在等离子反应器中热解过程的热流场模拟及分析[3,4]

利用数值模拟软件,首先进行前处理过程,通过对两矩形及圆柱体进行布尔交、并运算,建立等离子反应器实体模型,再对实体模型进行自由网格划分,在入口段及涡流区采用局部网格细划,并形成平面网格及其相应立体映射网格模型,本文示例将实体模型划分成 3 200 (平面网格)及 8 500 (立体网格)计算网格数,不同结构的等离子反应器网格如图 2所示.

输入热流体属性,其为随温度变化的非线性量,依据微分方程类型选择确定求解模型类型,施加载荷和约束 (即附加边界条件),采用不完全乔勒斯基共轭梯度法快速求解,并采用多种方法显示结果.

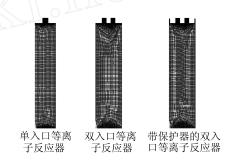


图 2 不同结构的等离子反应器

Fig. 2 Grid view of plasma reactor with single inlet, double inlet and double inlet with protective gas

2.2.1 单入口、双入口等离子反应器热流场模拟及分析

图 3 (a), (b) 为单入口、双入口等离子反应器中的粒子分布模拟,图 3 (c), (d) 为单入口、双入口等离子反应器速度等值线.

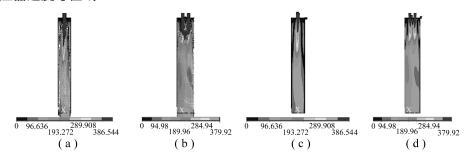


图 3 单入口、双入口等离子反应器中的粒子分布模拟及速度等值线

Fig. 3 Computed particle diffusion field and velocity field in plasma reactor with single inlet and double inlet

由图 3可知: 在反应器上部存在涡流区,优化前煤粉载气气流从反应器上部沿径向喷入,涡流区形成阻挡区域,不利于气流穿透进入高温反应区. 反应器中心区与反应器内壁面间存在较大的粒子扩散梯度,煤粉载气气流沿径向喷入需穿过边界层,才能到达反应核心区域. 因此只有部分煤粉到达反应核心区域,其余煤粉处于涡流区或边界层区域,其反应能力降低,通过对反应器出口固体残留物的分析,有15%左右的煤粉未发生任何反应,也验证了以上判断. 该类型的反应器结焦主要在进口以下 15~40 cm的区域,由图 3 (a),(b)的单入口、双入口等离子反应器中的粒子分布模拟图可以看出,在该范围内,存在高温区呈熔融状态的碳粒子的往复循环,其裹携着熔融状态碳粒子冲刷反应器内壁面,造成严重的结焦,反应器连续运行时间只有 4~5 h,为延长反应器连续运行时间,减少结焦,采用带保护气的反应器结构(图 3 (c),(d)). 双入口等离子反应器与单入口等离子反应器相比,扩大了反应器的工作区域,

能容纳更多的煤粉进行热解反应,进一步开发多入口 (10~15)的等离子反应器,在各入口间布置煤粉输入管,轴向喷入煤粉,其直接进入等离子场的高温区,有利于煤粉的转化.

2.2.2 带保护气的多入口等离子反应器热流场模拟及分析

图 $4(a) \sim (c)$ 为不同保护气流速等离子反应器粒子分布,图 $4(d) \sim (f)$ 为不同保护气流速等离子反应器速度等值线.

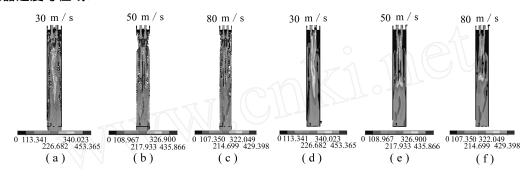


图 4 不同保护气流速等离子反应器粒子分布及速度等值线

Fig. 4 Computed particle diffusion field and velocity field in plasma reactor under gas flow rate 30, 50 and 80 m/s

由图 4可以看出,采用保护气的等离子反应器其携着熔融状态碳粒子的等离子环流与没有设置保护气等离子反应器相比,在壁面附近向下移动,当保护气流速为 $30\,\mathrm{m/s}$ 时,等离子环流下移 $20\,\mathrm{cm}$ 左右,当保护气流速为 $50,~80\,\mathrm{m/s}$ 时,等离子环流下移 $40,~60\,\mathrm{cm}$ 左右,从减少壁面结焦的角度来看,保护气速度越高越好,但同时,由于保护气的吸热,降低了等离子场的温度以及煤的热解反应速度。在等离子反应器优化设计时取保护气流速为 $50\,\mathrm{m/s}$

3 结 论

- (1) 等离子反应器采用双入口并进一步采用多入口结构,可扩大反应器的工作区域,容纳更多的煤粉进行热解反应,以提高反应器负荷,并为各入口间布置煤粉输入管,轴向喷入煤粉提供了条件.
- (2) 在等离子反应器的等离子体入口周边设置保护气,在等离子反应器的等离子场与等离子反应器的内壁面之间形成保护气层,可降低壁面结焦.
 - (3) 该等离子反应器的保护气的入口流速为 50 m/s时, 其特性最佳.

参考文献:

- [1] Xie Kechang, Lu Yongkang, Tian Yajun Study of coal conversion in an arc plasma jet [J]. Energy Sources, 2002, 24 (12): 1 093 ~ 1 098
- [2] 杨巨生,张永发,鲍卫仁,等. 煤等离子热解制乙炔反应器可用能利用研究 [J]. 化学反应工程与工艺,2005,21 (3):193~198
- [3] 谢克昌,田亚竣,陈宏刚,等. 煤在 H₂/Ar电弧等离子体中的热解 [J]. 化工学报,2001,52 (6):516~521.
- [4] 高 翔, 骆仲泱, 周劲松, 等. 旋流动力稳定性对传热影响的研究 [J]. 高校化学工程学报, 2003, 17 (6): 643 ~ 647.