

# 干熄炉的数值模拟分析

## Numerical Simulation Analysis on CDQ Stove

供稿|张丽珠, 毕延林, 黄德立 / ZHANG Li-zhu, BI Yan-lin, HUANG De-Li

### 内容摘要

研究一个复杂的工程实践问题的基本思想是把复杂的问题进行合理的抽象, 即建立该问题的数学模型, 这是解决整个问题的核心内容。文章以干熄炉为研究对象, 采用 Flunet 软件对其进行数值模拟分析, 着重研究了干熄炉内部的流场及非稳态温度场的分布情况, 并分析了随着冷却时间的延长, 干熄炉内部温度的变化情况, 为研制大型干熄炉提供了理论依据。

干熄炉是干熄焦装置中最重要的设备之一, 在干熄焦冷却循环系统中有着举足轻重的作用。本文以济钢集团国际工程技术有限公司(简称公司)所设计研制的干熄炉为模型, 使用 Fluent 软件对其进行数值模拟计算。在计算过程中将干熄炉内焦炭的冷却过程抽象为焦炭颗粒组成的多孔移动床与逆向流动的循环气体间的强迫对流换热<sup>[1]</sup>, 这个过程既涉及到气体在多孔床层内的流动, 又涉及到竖炉内焦炭的下降运动, 还要考虑二者间的热量交换。

### 数值模型

研究一个复杂的工程实践问题的基本思想是把复杂的问题进行合理的抽象, 即建立该问题的数学模型, 这是解决整个问题的核心内容。本文主要根据公司所设计的 160 t/h 干熄炉的炉型特点,

通过必要的简化处理获得物理模型, 进一步通过网格划分得到计算模型。根据公司所设计的干熄炉的结构尺寸, 由 GAMBIT 直接绘制, 如图 1 所示。

非结构网格有着极好的适应性, 尤其对具有复杂边界的流场计算问题特别有效。FLUENT5.0 以后的版本都支持非结构网格<sup>[2]</sup>。在本研究中, 由于模型形状比较

复杂的物体, 采用结构网格建模比较困难, 鉴于非结构网格适应性较好的特性, 本次计算采用非结构网格, 并分块构造, 网格模型如图 2 所示。

### 物性参数及边界条件

干熄炉热态模拟的关键在于流固耦合传热, 在用 GAMBIT 建模和画网格时将循环气体与焦炭



图1 干熄炉几何模型示意图



图2 干熄炉模型网格划分

之间的网格建成相互连接的网格,否则流体和固体间无法实现耦合传热。

### 循环气体及焦炭的物性参数

干熄焦炉内循环气体的成分以氮气为主,在生产中稍有波动,本次计算中采用的循环气体如表1所示,并按此成分计算循环气体的物性参数。

表1 循环气体的成分及质量分数 (%)

N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
70.8	3.6	16.8	0.55	8.25

焦炭含碳96%以上,热值约  $29 \times 10^3$  kJ/kg,其主要物理性质如下:真密度为1.8~1.95 g/cm<sup>3</sup>;视密度为0.88~1.08 g/cm<sup>3</sup>;气孔率为35%~55%;散密度为400~500 kg/m<sup>3</sup>;平均比热容为0.808 kJ/(kg·K)(100℃),1.465 kJ/(kg·K)(1000℃);热导率为0.733 W/(m·K)(常温),1.919 W/(m·K)(900℃)。

### 边界条件的确定

对于该模型采取的是分离式求解器,湍流模型采用的是标准k-ε模型<sup>[3]</sup>。

结合实际装料情况,给定结构尺寸、循环气体的循环风量、温度等物性参数,表2为设定的边界条件。

欠松弛因子的设置直接影响到收敛的速度。因此,设置合理的欠松弛因子是必要的,同时,在迭代的过程中要根据各项收敛的情况来随时改变松弛因子,这样有利于更快地收敛。初始化是给定计算的初始值,给定与计算结果接近的初始值可以使结果更快地收敛<sup>[4]</sup>。初始温度给定1223K(950℃),其他设置均采

表2 边界条件

	中心入口	边部入口
循环气体入口温度 /K	403	403
	10.40	14.87
	13.88	17.76
入口质量流量 / (kg/m <sup>2</sup> ·s)	15.38	19.76
	16.58	21.26
	17.88	23.00
碳温度 /K	1223	1223
焦炭空隙率	0.485	0.485
	6.488	9.732
	8.00	10.40
循环气体流量 / (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /h)	8.90	11.50
	9.56	12.44
	10.30	13.40

用默认值。

## 结果与分析

### 流场模拟

计算过程中假定焦炭为冷态,计算冷态情况下的循环气体流动情况。

#### (1) 速度云图及矢量图

结果收敛后,选取环形集气处建立截面,分析循环气体流量分别  $1.622 \times 10^5$ 、 $1.84 \times 10^5$ 、 $2.2 \times 10^5$  及  $2.37 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h 时的速度云图及速度矢量图。环形集气处内气体沿切线方向流动,且内侧流速比外侧流速快,从环形集气处两侧过来的气流在出口处汇集。而且环形集气处内气流流速最大处在环形集气处的出口处,随循环气体流量的加大,该处的速度云图颜色加深,当循环气体流量为  $2.37 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h 时,出口截面的平均流速为15 m/s,该处最大流速为26 m/s。位于出口对面的环形集气处内速度较小。而干熄炉焦炭内气流的速度很小(<1m/s)。

#### (2) 压力云图及中轴线压力分布

分析以上循环气体流量时的压力云图及中轴线压力分布图可知:循环气体的流量不影响干熄炉内压力分布的趋势,仅影响压力梯度的大小。干熄炉内有压力梯度的区域位于入口(5 m左右)至出口上沿(14 m左右),出口以上压力梯度很小。压力场的分布将影响温度场的分布。

干熄炉内压降随循环气体流量的增大而增加,其函数关系为:  $y = 19.602x^2 - 309.85x + 3224.6$ ,  $x$  为循环气体流量(10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/h);  $y$  为干熄炉内压力损失(Pa)。

#### 非稳态温度场模拟

在干熄炉热态模拟中,由于难以模拟热焦炭装入和冷焦炭排出的稳态过程,本次模拟采取将热焦炭充满干熄炉,模拟循环气体将整炉焦炭完全冷却的非稳态过程,以循环气体流量为  $18.4 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/h 为例,根据计算结果分析热焦炭在干熄炉内冷却的规律。

(1) 分析焦炭分别冷却 10、20、30、40 及 50 min 的温度分布和干熄炉中轴线上的温度分布图。

冷却 10 min 时, 中心风口与边部风口的冷却区域各自独立。而且从风帽上部 (5.4 m) 开始, 焦炭温度快速升高, 存在温度梯度的焦炭层厚度约 2.5 m。

冷却 20 min 时, 中心风口与边部风口的冷却区域已连接在一起。从风帽上部 (5.4 m) 开始, 焦炭温度快速升高, 存在温度梯度的焦炭层向上推移, 厚度约 3 m。

冷却 30 min 时, 中心风口与边部风口的冷却区域继续扩大并向上推移。存在温度梯度的焦炭层厚度约 3.5 m。

冷却 40 及 50 min 时, 中心风口与边部风口的冷却区域继续扩大并向上推移, 下部风口处开始出现均温区。存在温度梯度的焦炭层厚度约 4 m。

随着焦炭冷却时间的延长, 中心风口与边部风口的冷却区域从一开始的相互独立到后来慢慢的扩大并向上推移, 存在温度梯度的焦炭层厚度也逐步的增加, 当冷却时间为 50 min 时, 此厚度保持在了 4 m 左右。但是此冷却时间段内温度的变化一直没有影响到循环气体出口下沿 (11.4 m)。

(2) 分析焦炭分别冷却 60、70、80、90 及 100 min 的温度分布和干熄炉中轴线上的温度分布图。

冷却 60 min 时, 存在温度梯度的焦炭层厚度约 4 m, 温度的

变化梯度已经开始影响到循环气体出口下沿 (11.4 m)。

冷却 70 及 80 min 时, 存在温度梯度的焦炭层厚度约 4 m, 温度的变化梯度范围向循环气体出口上沿 (13.4 m) 推移。

冷却 90 min 时, 存在温度梯度的焦炭层厚度约 4 m, 温度的变化梯度范围已经到达循环气体出口上沿 (13.4 m)。

冷却 100 min 时, 存在温度梯度的焦炭层厚度约 5 m, 温度的变化梯度范围到达循环气体出口上沿 (13.4 m) 的上部。出口气体温度明显下降, 认为此时冷却结束。而且由温度分布图看出在干熄炉的下部焦炭冷却区域焦炭的温度分布并不均匀, 按焦炭温度可分为三个区域, 干熄炉边部位于边部风口上方的低温区、干熄炉中部位于中心风口上方的低温区、两个低温区之间的环状高温带, 高温区的焦炭大概比低温区的焦炭温度高 50℃ 左右。

通过计算在干熄炉内位于风口上部至循环气体出口中间高度为 6.981 m, 焦炭体积为 515.88 m<sup>3</sup>, 焦炭重量为 257.94 t, 熄焦时间为 1.67 h, 则熄焦能力为 154.4 t/h。

## 结束语

(1) 160 t/h 干熄炉内循环气体压降为 4868 Pa, 该干熄炉内压降随循环气体流量的函数关系为:  $y = 19.602x^2 - 309.85x + 3224.6$ ;

(2) 环形集气道内气流流速最大处在环形集气道的出口处, 位于出口对面的环形集气道内速度较小, 而干熄炉焦炭内气流的

速度很小;

(3) 循环气体的流量不影响干熄炉内压力分布的趋势, 仅影响压力梯度的大小。干熄炉内有压力梯度的区域位于入口 (5 m 左右) 至出口上沿 (14 m 左右), 出口以上压力梯度很小。

(4) 计算所得存在温度梯度的焦炭层最大厚度为 (5 m)。

(5) 在干熄炉的下部焦炭冷却区域焦炭的温度分布并不均匀, 按焦炭温度可分为三个区域, 干熄炉边部位于边部风口上方的低温区、干熄炉中部位于中心风口上方的低温区、两个低温区之间的环状高温带, 高温区的焦炭大概比低温区的焦炭温度高 50℃ 左右。

## 参考文献

- [1] 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.5.
- [2] 韩占忠, 王敏, 兰小平. FLUENT—流体工程仿真计算实例与应用. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.6.
- [3] 李文华, 苏明军. 常用湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用. 水泵技术, 2006, (4).
- [4] 谭廷帅. 清洗液阀过流能力提高的研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.6.

## 作者简介

张丽珠, 高级工程师, 毕业于北京科技大学冶金工程专业, 硕士研究生, 现从事热能工程设计及理论研究。