

# 炼油厂内加热炉的富氧燃烧模型及其现实意义

宋加瑞, 李建廷

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年2月15日; 录用日期: 2022年3月14日; 发布日期: 2022年3月22日

## 摘要

管式加热炉是炼化企业内的主要耗能装置, 也是最主要的烟气排放设备。将富氧燃烧技术应用在管式加热炉上, 一方面有利于燃料的高效燃烧, 另一方面也减少了烟气的排放。在我国的炼化企业内, 对于富氧燃烧在加热炉上的应用相对较少, 研究极其匮乏。本文对炼化企业内的炉子建立富氧燃烧数值模型, 分析建立该模型的意义。

## 关键词

节能, 减排, 数值模拟

# Oxygen-Enriched Combustion Model of Heating Furnace in Refinery and Its Practical Significance

Jiarui Song, Jianting Li

School of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 15<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 14<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2022

## Abstract

Tubular heating furnace is the main energy-consuming device and the most important flue gas emission equipment in refining and chemical enterprises. The application of oxygen-enriched combustion technology in tubular heating furnace is not only beneficial to the efficient combustion of fuel, but also reduces the emission of flue gas. In China's refineries, the application of oxy-

**gen-enriched combustion in heating furnace is relatively rare, and the research is extremely scarce. In this paper, a numerical model of oxygen-enriched combustion is established for furnaces in refineries, and the significance of this model is analyzed.**

## Keywords

Energy Saving, Emission Reduction, Numerical Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 绪论

随着时代的发展和社会的进步, 节能减排成了一个不可忽视的话题。近年来, 我国出台了一系列政策来改善环境, 节约能源。2005年, 中国共产党在十六届五中全会上, 首次提出了减排这个概念[1]。2006年, 在减排的基础上, 十一五规划纲要又提出了节能的话题, 第一次把节约资源作为国家的基本国策。

截至目前为止, 节能减排问题主要是与一些高耗能高污染的超大规模生产行业有关。根据国家统计局的数据, 能源使用和污染排放最主要的行业集中在钢铁、有色金属、石油加工、建筑材料、发电、化工等行业。这些行业产业规模庞大, 生产能力强, 发展速度快。以炼化企业为例, 目前我国有二百多家炼油厂, 截至2017年底, 在我国的炼油厂中, 仅千万吨级以上的就有23家[2]。并且随着十三五计划的开展, 又有一批大型炼油厂开始建设投产。

石油加工行业作为高耗能高排放行业, 每年的能源消耗和烟气排放都十分巨大。为了响应国家的政策要求, 各大石化企业近年来也一直在积极应对与解决这个问题。而加热炉作为炼化企业中的主要能耗以及废气排放装置, 提高加热炉的热效率尤为重要。

富氧燃烧作为一项潜力巨大的节能和减排技术, 把他应用在炼化企业的加热炉上具有极大的研究价值。通过提高助燃空气中的氧含量, 一方面可以促进燃料的充分燃烧, 大大提高加热炉的热效率。另一方面随着氧气浓度的提升, 燃烧所需要的助燃空气量会随之减少, 产生的烟气量同样也会减少[3]。这不仅避免了燃料加热额外氮气时所导致的资源浪费, 又降低了炉子在排烟时的能量损失。因此将富氧燃烧技术应用在加热炉上, 对于节能和减排两个方向都会产生一定的价值。

相对与西方国家, 我国对富氧燃烧技术的研究相对较少[4]。国内虽然在冶金、炼钢、煤粉燃烧以及玻璃制造等行业都有富氧燃烧的应用, 可其目的大多是为了提高火焰燃烧温度。而在石油化工行业, 富氧燃烧技术几乎没有应用, 这是因为炼化企业一般不会需要太高的温度[5]。而随着国家对于节能减排的重视, 富氧燃烧技术也显现出了巨大的发展潜力, 成为未来加热炉改进的方向之一。炼化企业加热炉众多, 许多炼油工艺例如常减压蒸馏、催化重组、柴油加氢等都涉及到加热炉的使用。加热炉的能耗一般占炼油厂总耗能的七成左右[6], 因此富氧燃烧技术在炼油厂内加热炉上的应用至关重要。

炼化企业的各种设备复杂且危险系数高, 一旦出现意外便会损失巨大。因此, 对在加热炉上使用富氧燃烧技术的实际研究较为困难。而通过建立燃烧模型, 对加热炉进行数值模拟则成为了一个必要的手段。本文以炼化企业内管式加热炉为研究对象, 以炼厂气为燃料气建立炉子辐射室的燃烧模型。通过建立的模型, 可以计算出各种燃料组分的燃烧特性, 同时也能将炉膛温度控制在一个合理的范围内, 避免烧穿炉管的风险[7]。除此之外, 通过模拟也可以计算出烟气以及污染气体的减少量, 为富氧燃烧技术在保护环境上的应用提供一定的理论参考。除此之外, 富氧燃烧技术在垃圾焚烧发电等方向也有着广阔的

应用前景, 具有极大的发展潜力和研究价值[8]。

## 2. 燃烧模型

### 2.1. 炼厂气

炼厂气主要生产于催化裂化、加氢精制、石油焦化等石油炼制工艺, 是炼油厂中的主要副产物, 也是一种常见的燃料气体[9]。

炼厂气主要由 C4 以下的烃类成分组成, 除此之外还包含氮气、二氧化碳等少量组分。

每个炼油厂和不同工艺副产的炼厂气组分不同, 因此由不同工艺产出的炼厂气的热值也是不同[10]。

炼厂气的组分如表 1 所示, 炼厂气在燃烧时所释放的热值也主要与这些组分的质量分数有关, 其各种组分释放的化学能如下[11]:

**Table 1.** Composition of refinery gas

**表 1.** 炼厂气的组分

组分名称	分子式	分子量	密度(kg/Nm <sup>3</sup> )	质量分数(%)
甲烷	CH <sub>4</sub>	16.042	0.7162	16.4
乙烷	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.680	1.3423	14.4
丙烯	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.078	1.8785	14.8
丙烷	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.094	1.9685	15.6
丁烷	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.120	2.5946	24.2
氧气	O <sub>2</sub>	32.0	1.4286	7.3
氮气	N <sub>2</sub>	28.02	1.2509	7.3

$$Q_{[\text{CH}_4]} = (m_{[\text{CH}_4]\text{in}} - m_{[\text{CH}_4]\text{out}}) h_{[\text{CH}_4]} \quad (2.1)$$

$$Q_{[\text{C}_2\text{H}_6]} = (m_{[\text{C}_2\text{H}_6]\text{in}} - m_{[\text{C}_2\text{H}_6]\text{out}}) h_{[\text{C}_2\text{H}_6]} \quad (2.2)$$

$$Q_{[\text{C}_3\text{H}_8]} = (m_{[\text{C}_3\text{H}_8]\text{in}} - m_{[\text{C}_3\text{H}_8]\text{out}}) h_{[\text{C}_3\text{H}_8]} \quad (2.3)$$

$$Q_{[\text{C}_3\text{H}_6]} = (m_{[\text{C}_3\text{H}_6]\text{in}} - m_{[\text{C}_3\text{H}_6]\text{out}}) h_{[\text{C}_3\text{H}_6]} \quad (2.4)$$

$$Q_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]} = (m_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]\text{in}} - m_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]\text{out}}) h_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]} \quad (2.5)$$

$$Q = Q_{[\text{CH}_4]} + Q_{[\text{C}_2\text{H}_6]} + Q_{[\text{C}_3\text{H}_8]} + Q_{[\text{C}_3\text{H}_6]} + Q_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]} \quad (2.6)$$

通过上述公式, 可以计算出燃料气体中的每种组分的化学能, 也就是各种烃类组分燃烧所释放的能量。在上述方程中, 只需要确定燃料组分的进口质量  $m_{\text{in}}$ 、出口质量  $m_{\text{out}}$  以及各种燃料组分的热值  $h$ , 便可求出每种燃料组分释放的能量。以炼厂气中重要的燃料组分甲烷为例, 要确定甲烷所释放的热能  $Q_{\text{CH}_4}$ , 只需确定进气中甲烷的质量  $m_{[\text{CH}_4]\text{in}}$ , 烟气中剩余甲烷的质量  $m_{[\text{CH}_4]\text{out}}$  以及甲烷的热值  $h_{[\text{CH}_4]}$ 。

### 2.2. 炉子燃烧模型

#### 2.2.1. 燃烧反应

普通的燃烧过程需要三个必要条件, 分别是燃点温度、助燃空气和可燃物。而对于炼油厂内加热炉

的模拟要保证加热炉内炼厂气的充分燃烧, 这就要求炼厂气与助燃空气充分混合。因此除了上述三个燃烧的的必要条件外, 还需要对燃烧模型进行以下假设: 有效的湍动、助燃气体足够充分、炉膛体积足够大以及对于热负荷的有效控制[12]。基于这些要求, 本课题采用了充分混合的理想反应器模型。在这种模型有限的空闲内部, 可以实在助燃气体与燃料的充分混合, 实现充分的湍动。在此模型中, 辐射室各处温度均匀, 只是时间的函数而与空间坐标无关。

燃烧是一个复杂的过程, 涉及到了复杂的物理和化学变化。炉子中的燃烧过程包含了燃料气、助燃空气以及燃烧产物之间的质量及能量交换, 这在现实中很难对其进行研究, 因此编写程序对其进行模拟是研究燃烧过程的有效手段。炼厂气的燃烧其实就是炼厂气中各种烃类分子高温下与氧气的反应过程, 其发生的化学反应如下:



### 2.2.2. 质量守恒

如图 1 所示, 炉子中燃料燃烧的质量守恒符合充分混合的反应器模型, 进气量等于排烟量。进料气体中有多种气体组分, 分别包含氧气、氮气、甲烷、乙烷、丙烷、丙烯、丁烷以及少量的二氧化碳和水蒸气, 这些组分在炼厂气中的含量如表 1 所示。因为炼油厂内管式加热炉的炉膛温度不会过高, 因此这里假定氮气不参与反应。进料气体质量与出口烟气质量遵循质量守恒定律, 守恒方程式如下:

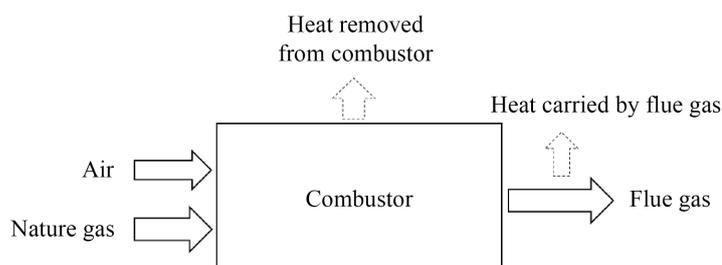


Figure 1. The fully mixed reactor model  
图 1. 充分混合的反应器模型

$$m_{\text{in}} + m_{\text{air}} = m_{\text{gas}} \quad (2.12)$$

$m_{\text{in}}$ : 进入燃烧室的炼厂气流量。

$m_{\text{air}}$ : 助燃空气流量。

$m_{\text{gas}}$ : 烟气流量。

炼厂气在燃烧的过程中, 各种燃料组分的质量分数会不断变化。随着甲烷、乙烷等燃料气体的不断减少, 二氧化碳和水蒸气的含量则会不断增多。在烟气中, 存在二氧化碳、水、氮气、氧气以及未烧完的甲烷、乙烷、丙烷、丙烯、丁烷。通过以下等式, 可以确定烟气中各种气体组分的质量。

$$m = m_{\text{gas}}x \quad (2.13)$$

其中  $m$  是烟气中气体组分  $i$  的质量,  $m_{\text{gas}}$  是烟气的总质量,  $x$  则是气体组分  $i$  占总烟气的质量分数。以甲烷为例子, 求解其在烟气中剩余量的公式如下:

$$m_{[\text{CH}_4]} = m_{\text{gas}}x_{[\text{CH}_4]} \quad (2.14)$$

因为无法确定各种气体组分占烟气的质量分数  $x$ , 因此第一次需要对各种气体在烟气中的质量分数进行合理的假设。只要确定了烟气中各种气体组分的质量分数, 每种气体组分的质量守恒也因此确定, 具体方程如下:

$$16\omega_{[\text{CH}_4]}V + m(y_{[\text{CH}_4]}^{\text{in}} - y_{[\text{CH}_4]}) = 0 \quad (2.15)$$

$$30\omega_{[\text{C}_2\text{H}_6]}V + m(y_{[\text{C}_2\text{H}_6]}^{\text{in}} - y_{[\text{C}_2\text{H}_6]}) = 0 \quad (2.16)$$

$$44\omega_{[\text{C}_3\text{H}_8]}V + m(y_{[\text{C}_3\text{H}_8]}^{\text{in}} - y_{[\text{C}_3\text{H}_8]}) = 0 \quad (2.17)$$

$$42\omega_{[\text{C}_3\text{H}_6]}V + m(y_{[\text{C}_3\text{H}_6]}^{\text{in}} - y_{[\text{C}_3\text{H}_6]}) = 0 \quad (2.18)$$

$$58\omega_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]}V + m(y_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]}^{\text{in}} - y_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]}) = 0 \quad (2.19)$$

$$64\omega_{[\text{CH}_4]}V + 112\omega_{[\text{C}_2\text{H}_6]}V + 160\omega_{[\text{C}_3\text{H}_8]}V + 144\omega_{[\text{C}_3\text{H}_6]}V + 208\omega_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]}V + m(y_{[\text{O}_2]}^{\text{in}} - y_{[\text{O}_2]}) = 0 \quad (2.20)$$

$$-44\omega_{[\text{CH}_4]}V - 88\omega_{[\text{C}_2\text{H}_6]}V - 132\omega_{[\text{C}_3\text{H}_8]}V - 132\omega_{[\text{C}_3\text{H}_6]}V - 176\omega_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]}V + m(y_{[\text{CO}_2]}^{\text{in}} - y_{[\text{CO}_2]}) = 0 \quad (2.21)$$

$$y_{[\text{N}_2]} = y_{[\text{N}_2]}^{\text{in}} \quad (2.22)$$

$$1 - y_{[\text{CH}_4]} - y_{[\text{C}_2\text{H}_6]} - y_{[\text{C}_3\text{H}_8]} - y_{[\text{C}_3\text{H}_6]} - y_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]} - y_{[\text{O}_2]} - y_{[\text{CO}_2]} - y_{[\text{N}_2]} = 0 \quad (2.23)$$

公式 2.7~2.13 分别是甲烷、乙烷、丙烷、丙烯、丁烷、氧气、二氧化碳和氧气的质量守恒方程, 氮气反应前后质量不变, 水蒸气的质量守恒如公式 2.15 所示。

上述质量守恒方程都涉及到了组分的反应速率  $\omega$ , 要计算各组分的反应速率, 则需要求解不同组分的反应速率方程。参与反应的组分主要是甲烷、乙烷、丙烷、丙烯和丁烷, 这些组分的反应速率方程一旦确定, 二氧化碳和水的生成速率方程也随之确定。具体方程如下:

$$\omega_{[\text{CH}_4]} = -k_{[\text{CH}_4]} \left( \frac{pMW_{\text{mix}}}{R_u T} \right)^{1.5} \left( \frac{y_{[\text{CH}_4]}}{16} \right)^{0.7} \left( \frac{y_{[\text{O}_2]}}{32} \right)^{0.8} \quad (2.24)$$

$$\omega_{[\text{C}_2\text{H}_6]} = -k_{[\text{C}_2\text{H}_6]} \left( \frac{pMW_{\text{mix}}}{R_u T} \right)^{1.75} \left( \frac{y_{[\text{C}_2\text{H}_6]}}{30} \right)^{0.1} \left( \frac{y_{[\text{O}_2]}}{32} \right)^{1.65} \quad (2.25)$$

$$\omega_{[\text{C}_3\text{H}_8]} = -k_{[\text{C}_3\text{H}_8]} \left( \frac{pMW_{\text{mix}}}{R_u T} \right)^{1.75} \left( \frac{y_{[\text{C}_3\text{H}_8]}}{44} \right)^{0.1} \left( \frac{y_{[\text{O}_2]}}{32} \right)^{1.65} \quad (2.26)$$

$$\omega_{[\text{C}_3\text{H}_6]} = -k_{[\text{C}_3\text{H}_6]} \left( \frac{pMW_{\text{mix}}}{R_u T} \right)^{1.75} \left( \frac{y_{[\text{C}_3\text{H}_6]}}{42} \right)^{-0.1} \left( \frac{y_{[\text{O}_2]}}{32} \right)^{1.85} \quad (2.27)$$

$$\omega_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]} = -k_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]} \left( \frac{pMW_{\text{mix}}}{R_u T} \right)^{1.75} \left( \frac{y_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]}^{\text{in}}}{58} \right)^{0.15} \left( \frac{y_{[\text{O}_2]}}{32} \right)^{1.6} \quad (2.28)$$

在求解各种气体组分反应速率的过程中, 需要混合组分的摩尔质量以及公式中所涉及的反应速率常数。

$$k_{[\text{CH}_4]} = 5.01 \times 10^{11} \exp\left(\frac{-24331}{T}\right) \quad (2.29)$$

$$k_{[\text{C}_2\text{H}_6]} = 6.19 \times 10^9 \exp\left(\frac{-15098}{T}\right) \quad (2.30)$$

$$k_{[\text{C}_3\text{H}_8]} = 4.16 \times 10^9 \exp\left(\frac{-15098}{T}\right) \quad (2.31)$$

$$k_{[\text{C}_3\text{H}_6]} = 2.3 \times 10^9 \exp\left(\frac{-15098}{T}\right) \quad (2.32)$$

$$k_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]} = 4.14 \times 10^9 \exp\left(\frac{-15098}{T}\right) \quad (2.33)$$

混合气体的摩尔质量:

$$MW_{\text{mix}} = \frac{1}{\frac{y_{[\text{CH}_4]}}{16} + \frac{y_{[\text{C}_2\text{H}_6]}}{30} + \frac{y_{[\text{C}_3\text{H}_8]}}{44} + \frac{y_{[\text{C}_3\text{H}_6]}}{42} + \frac{y_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]}{58}}{58} + \frac{y_{[\text{O}_2]}}{32} + \frac{y_{[\text{H}_2\text{O}]}}{18} + \frac{y_{[\text{CO}_2]}}{44} + \frac{y_{[\text{N}_2]}}{28}} \quad (2.34)$$

### 2.2.3. 能量守恒

如图 1 所示, 加热炉内同样遵循能量守恒原则, 进入的能量与消耗的能量相同。进入炉子的能量主要包括空气带入的潜热以及燃料所携带的化学能。而消耗的能量则是包括烟气带走的能量以及加热炉管中物料所消耗的能量。助燃空气一般需要被预热到 200 摄氏度左右才与燃料气体混合, 因此带着一定的潜热  $Q_{\text{air}}$ 。而燃料所携带的化学能为  $Q_{\text{fuel}}$ , 所以进入炉子的总能量  $Q_{\text{total}}$  为:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{air}} + Q_{\text{fuel}} \quad (2.35)$$

其中

$$Q_{\text{fuel}} = \dot{m}_{\text{fuel}} h_{\text{fuel}} \quad (2.36)$$

$$Q_{\text{air}} = \dot{m}_{\text{air}} [\bar{h}_{\text{air}}(T_{\text{air}}) - \bar{h}_{\text{air}}(298)] \quad (2.37)$$

因此加热炉的能量守恒公式为:

$$Q_{\text{out}}/\dot{m} + \sum y_{[i]} h_{[i]}(T) - \sum y_{[i]\text{in}} h_{[i]\text{in}} = 0 \quad (2.38)$$

$$h = h_{\text{prod}} - h_{\text{reac}} \quad (2.39)$$

$h_{\text{prod}}$  和  $h_{\text{reac}}$  分别是反应物和反应产物的焓值,  $Q_{\text{out}}$  是炉子的热负荷,  $m$  是燃料的总质量。要计算能量守恒, 则必须确定各种气体组分的焓值, 可根据下列公式计算:

$$h_{[\text{CH}_4]}(T) = -74831/16 + \bar{c}_{p[\text{CH}_4]}(T - 298) \quad (2.40)$$

$$h_{[\text{C}_2\text{H}_6]}(T) = -84667/30 + \bar{c}_{p[\text{C}_2\text{H}_6]}(T - 298) \quad (2.41)$$

$$h_{[\text{C}_3\text{H}_8]}(T) = -103847/44 + \bar{c}_{p[\text{C}_3\text{H}_8]}(T - 298) \quad (2.42)$$

$$h_{[\text{C}_3\text{H}_6]}(T) = 20414/42 + \bar{c}_{p[\text{C}_3\text{H}_6]}(T - 298) \quad (2.43)$$

$$h_{[\text{C}_4\text{H}_{10}]}(T) = -124733/58 + \bar{c}_{p[\text{C}_4\text{H}_{10}]}(T - 298) \quad (2.44)$$

$$h_{[\text{O}_2]}(T) = 0 + \bar{c}_{p[\text{O}_2]}(T - 298) \quad (2.45)$$

$$h_{[\text{CO}_2]}(T) = -393546/44 + \bar{c}_{p[\text{CO}_2]}(T - 298) \quad (2.46)$$

$$h_{[\text{H}_2\text{O}]}(T) = -241845/18 + \bar{c}_{p[\text{H}_2\text{O}]}(T - 298) \quad (2.47)$$

$$h_{[\text{N}_2]}(T) = 0 + \bar{c}_{p[\text{N}_2]}(T - 298) \quad (2.48)$$

把七种气体组分的质量守恒方程以及一个总的能量守恒方程联立起来, 则可以构成一个八行八列的矩阵:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

在此矩阵中,  $x_1 \sim x_7$  分别是质量守恒方程中各种气体组分占烟气的质量分数, 而  $x_8$  则是能量守恒方程中的炉膛温度。要求解此方程, 必须对烟气中各种气体组分的质量分数以及炉膛温度设置一个合理的初值, 然后经过大量迭代计算出贴近真实的结果。在第一次计算中, 因为炉膛温度和烟气组分都是设定值, 质量守恒和能量守恒的值一般都与真实值相差较大。

因此需要利用牛顿迭代法通过大量的迭代计算, 直至最后守恒结果趋近于 0 为止。

### 2.3. 数学模型

因为极大多数方程都不存在求根公式, 所有对这些方程进行求解身份复杂, 而牛顿迭代法则是一种用来求解方程近似根的方法。这种方法主要是把方程式进行泰勒级数展开, 然后通过迭代将非线性方程线性化。使用牛顿迭代法, 一般情况下要通过确定迭代变量、建立迭代关系式、对迭代过程进行控制[13]。迭代的具体步骤如下:

$$F(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \in R \quad (2.50)$$

$$F(x) = 0 \quad (2.51)$$

第一步首先要赋初值,  $x^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})^T$  便是方程组  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  的初值。

接下来则需要对于上述方程组进行泰勒展开, 将  $f_i(x)$  在  $x^{(0)}$  点附近进行泰勒展开, 舍去两阶以上的偏导数项:

$$f_i(x) - f_i(x^{(0)}) = \sum_{k=0}^n \left[ \frac{\partial f_i(x^{(0)})}{\partial x_k} \right] (x_k - x_k^{(0)}) \quad (2.52)$$

令

$$Y_i^{(0)} = f_i(x) - f_i(x^{(0)}), \quad \alpha_k^{(0)} = x_k - x_k^{(0)}, \quad (2.53)$$

$$A_{ik}^{(0)} = \frac{\partial f_i(x^{(0)})}{\partial x_{ik}} \quad (2.54)$$

$$Y_i^{(0)} = \sum_{k=0}^n A_{ik}^{(0)} \alpha_k^{(0)} \quad (2.55)$$

把上式子化成矩阵

$$Y^{(0)} = \sum A^{(0)} \alpha^{(0)} \quad (2.56)$$

将上式拆解

$$Y_{n \times 1}^{(0)} = \begin{pmatrix} f_1 - f_1(x^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n - f_n(x^{(0)}) \end{pmatrix}, \quad A_n^{(0)} = \begin{pmatrix} A_{10}^{(0)} & \cdots & A_{1n}^{(0)} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n0}^{(0)} & \cdots & A_{nn}^{(0)} \end{pmatrix}, \quad \alpha_n^{(0)} = \begin{pmatrix} \alpha_0^{(0)} \\ \vdots \\ \alpha_n^{(0)} \end{pmatrix} \quad (2.57)$$

估算修正系数:

$$\alpha^{(0)} = \sum (A^{(0)})^{-1} Y^{(0)} \quad (2.58)$$

若设置的初值为  $x^{(0)}$ , 那么

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \alpha^{(0)} \quad (2.59)$$

$$x^{(s+1)} = x^{(s)} + \alpha^{(s)} \quad (2.60)$$

最后判断结果的收敛程度, 用修正因子的绝对值来判断, 即:

$$\sigma = \sum |\alpha_i^{(s)}(s)| < \varepsilon \quad (2.61)$$

当计算结果符合条件时, 迭代计算结束。

### 3. 建立富氧燃烧模型的意义

在许多化工生产行业之中, 加热炉都是最主要的耗能设备。据统计, 在中国所有的耗能设备中, 加热炉的能耗排名第二[14]。因此, 将富氧燃烧技术应用在加热炉上具有极大的发展潜力。将富氧燃烧技术应用在炼油厂的加热炉上有很多好处, 其具体优势如下:

- 1) 提高劣质燃料的应用范围。
- 2) 促使燃料充分燃烧, 更大程度的利用燃料热能, 降低能耗。
- 3) 减少理论进气量, 助燃空气中的氮气含量大大减少。如此一来不仅避免了节炼厂气加热氮气的浪费, 也减少了烟气中  $\text{NO}_x$  的排放[15]。
- 4) 随着燃料的充分燃烧以及烟气质量的减少, 烟气中二氧化碳浓度会大大升高。这不仅有利于对于尾气中二氧化碳的捕捉, 同时也减少了排烟时的能量浪费。

虽然富氧燃烧技术应用在加热炉上优势巨大, 可由于现实中一些条件的限制如温度过高有烧穿炉管的风险, 因此很难对于炼油厂中的加热炉进行实际富氧燃烧研究。如此一来, 对于加热炉进行富氧燃烧数值模拟就极为重要。通过建立燃烧模型, 可以观察各种燃料的燃烧特性, 还可以计算出节省的燃料量和烟气量。通过在计算机上对辐射室燃烧模型进行调试可以控制加热炉炉膛的温度变化, 从而探究何种浓度下的富氧环境可以将炉膛温度控制在安全范围内。

除此之外, 炼油厂内部的许多公用工程装置每年都会向大气中排放大量的氧气, 造成了资源的不必

要浪费。若是将这些氧气用于制造富氧环境, 则可以减少富氧工艺中氧气的生产成本, 这是富氧燃烧工艺在炼油厂的加热炉上应用的巨大优势。富氧燃烧技术适用于不同燃料的燃烧, 可以提高劣质燃料的燃烧范围, 避免了大量劣质能源的浪费。

因此, 对于炼油厂内的管式加热炉建立富氧燃烧模型, 有着巨大的发展潜力和研究价值。

#### 4. 结论

富氧燃烧技术在炼化企业内加热炉上的应用是未来的一个重要发展方向, 无论是在节能和还是环保方面都有着巨大的发展潜力。而对炼油厂内的加热炉进行现实研究有些困难, 因此对炉内的燃烧情况建立数学模型便成了一个可行的途径。

本文通过对以炼厂气为燃料的富氧燃烧过程进行数学建模, 能够先从理论层面对其进行分析, 同时为以后的研究者提供一定的理论基础。

#### 参考文献

- [1] 赵丽华, 齐莹, 刘亚丽. 浅析炼油化工企业节能降耗技术[J]. 中国化工贸易, 2018, 10(2): 158.
- [2] 孟宪玲. 我国炼油行业节能综述[J]. 当代石油石化, 2005, 13(3): 31-34.
- [3] 裴召华. 提高管式加热炉热效率的措施[J]. 油气储运, 2009, 28(11): 52-54.
- [4] 罗国明, 温志红. 富氧燃烧技术应用中几个关键问题的探讨[J]. 工业炉, 2011, 33(6): 15-17.
- [5] 刘彦, 张少华, 徐江荣. 富氧燃烧技术研究现状及发展[J]. 能源工程, 2013(6): 50-56.
- [6] 方言. 富氧煅烧技术在国内大型水泥窑上首获成功[J]. 四川水泥, 2013(1): 44-45.
- [7] 王海鸥. 复杂多相湍流燃烧的直接数值模拟[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [8] 何雪鸿. 富氧焚烧垃圾发电技术研究及烟气净化工艺模拟[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [9] 王政伟, 吕宏伟, 张光斌. 富氧燃烧技术及其节能环保特性分析[J]. 化工机械, 2011, 38(3): 260-263.
- [10] 钱家麟, 于遵宏, 王兰田, 等. 管式加热炉[M]. 第二版. 北京: 中国石化出版社, 2003.
- [11] Toftegaard, M.B., Brix, J. and Jensen, P.A. (2010) Oxy-Fuel Combustion of Solid Fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, **36**, 581-625. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.02.001>
- [12] Liu, X., Chen, M. and Yu, D. (2013) Oxygen Enriched Co-Combustion Characteristics of Herbaceous Biomass and Bituminous Coal. *Thermochimica Acta*, **569**, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.06.037>
- [13] Grandmaison, E.W., Poirier, D.J. and Boyd, E. (2003) Development of an Oxygen-Enriched Furnace System for Reduced CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> Emissions for the Steel Industry. Final Report, AISI/DOE Technology Roadmap Program, Estados Unidos.
- [14] 解长举. 大型步进式加热炉炉内流动与传热的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2007.
- [15] 杨皎. 某 600 Mw 机组锅炉低 NO<sub>x</sub> 改造数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2014.