

# 油页岩地下原位转化螺旋折流板式井下加热器表面传热特性及数值传热模拟研究

张 渺<sup>1,2,3</sup>, 郭 威<sup>1,2,3</sup>, 李 强<sup>1,2,3</sup>, 孙中瑾<sup>4</sup>, 王振东<sup>1,2,3</sup>, 赵 帅<sup>1,2,3</sup>, 曲莉莉<sup>2,3</sup>

(1.油页岩地下原位转化与钻采技术国家地方联合工程实验室,吉林 长春 130026; 2.国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室,吉林 长春 130026; 3.吉林大学建设工程学院,吉林 长春 130026; 4.山东省地矿工程勘察院,山东 济南 250014)

**摘要:**油页岩地下原位转化技术的关键是要把油页岩加热至高温裂解状态,采用井中直接加热的方式可实现对油页岩地层的直接加热,能量利用率最高,热损失最小,已经成为油页岩原位转化的主要加热方式。本文研究了一种新型的井下螺旋折流板式加热器,其传热通道呈螺旋形连续分布,能有效地增加气体和加热管的接触时间,可显著提高加热管表面的传热系数。本文重点研究螺旋折流板式井中加热器的表面传热特性,通过数值模拟及理论推导,综合分析了螺旋折流板的螺距和气体的质量流量对加热管表面传热系数的影响规律,得出了折流板螺距越小或气体质量流量越大加热管表面传热系数越高的结论,并求出了加热管表面传热系数随螺距和气体质量流量变化的拟合方程,为螺旋折流板加热器的后续设计提供了理论支撑。

**关键词:**油页岩;原位开采;螺旋折流板;数值模拟;传热系数;折流板螺距;气体质量流量

**中图分类号:**P618.12 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)07-0062-04

**Research on Heat Transfer Characteristics and Numerical Simulation of Oil Shale In-situ Pyrolysis Heater with Spiral Baffle/ZHANG Miao<sup>1,2,3</sup>, GUO Wei<sup>1,2,3</sup>, LI Qiang<sup>1,2,3</sup>, SUN Zhong-jin<sup>4</sup>, WANG Zhen-dong<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Shuai<sup>1,2,3</sup>, QU Li-li<sup>2,3</sup>** (1.National-Local Joint Engineering Laboratory of In-situ Conversion, Drilling and Exploitation Technology for Oil Shale, Changchun Jilin 130026, China; 2.Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Condition, Ministry of Land and Resource, Changchun Jilin 130026, China; 3.College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 4.Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute, Jinan Shandong 250014, China)

**Abstract:** The ultimate aim of the oil shale in-situ pyrolysis technology is to heat the oil shale to the state of pyrolysis. Direct heating, which can be realized by heating in the well to achieve the highest energy utilization rate with the smallest heat loss, has become the main heating way of the in-situ pyrolysis. In this paper, a new type of downhole heater with spiral baffle is developed, and due to the spiral continuous distribution, the contact time of gas and heating rod can be effectively prolonged to remarkably increase the heat transfer coefficient of heat rod surface. This paper also focuses on surface heat transfer characteristics of the in-situ pyrolysis heater with spiral baffle. Through the numerical simulation and theoretical deduction, the effects of the spiral baffle's pitch and the gas mass flow on the heat transfer coefficient of the heating rod surface is analyzed, it is concluded that the smaller the pitch of the baffle or the larger the gas mass flow the higher the heat transfer coefficient of the heating rod; in the meanwhile, the fitting equations for heat transfer coefficient of heating rod surface changing with the pitch and gas mass flow are obtained to provide the theoretical support for the following-up design of the heater with spiral baffle.

**Key words:** oil shale; in-situ pyrolysis; spiral baffle; numerical simulation; heat transfer coefficient; spiral baffle's pitch; gas mass flow

## 0 引言

油页岩(又称油母页岩)是一种高灰分的含可燃有机质的沉积岩。全球油页岩资源折算成页岩油约有 4090 亿 t,超过了世界原油可采储量(1700 亿 t),

也超过了世界原油资源量(3000 亿 t)<sup>[1-4]</sup>。现有的油页岩原位开采技术主要是通过通过在油页岩地下储层对油页岩进行高温加热,将固体干酪根转化为液态烃,通过石油天然气的开采技术将其从地下开采到

收稿日期:2018-02-01; 修回日期:2018-07-01

基金项目:吉林省发改委项目“吉林省扶余千吨级油页岩示范工程项目”;吉林省省校共建计划专项“油页岩地下原位开发利用示范工程”(编号:SF2017-5-1);吉林大学高层次科技创新团队建设项目(编号:2017TD-13);中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介:张渺,男,满族,1994 年生,地质工程专业,吉林大学硕士研究生在读,主要从事油页岩地下原位转化技术研究,吉林省长春市西民大街 938 号,1054509387@qq.com。

地表<sup>[5-10]</sup>。目前,吉林大学实施的“扶余油页岩原位转化试验工程”,使用局部化学反应法技术,项目组目前利用横向折流板电加热器于井底对注入的气体进行加热<sup>[11]</sup>。考虑到横向折流板加热器较低的加热效率,本文模拟分析了一种新型的井下加热器,即螺旋折流板加热器,通过数值模拟分析找出螺旋折流板的螺距及注入气体的质量流量对加热管表面传热系数的影响规律,并结合理论公式的推导,验证数值模拟结果的准确性,最终求出传热系数的拟合方程,为加热器的后续设计提供理论支撑。

## 1 螺距对加热管表面传热系数的影响

本文所讨论的加热管表面传热系数主要是用来衡量对流换热效果的好坏,表面传热系数越大,加热管表面的对流换热效果越好,另外由于加热器内部气体的流通通道不断发生变化,故加热管表面不同位置的传热系数也各不相同。当折流板的螺距以及气体质量流量发生改变时,气体通道内的流场也随之发生着变化,直接影响了加热管表面的对流换热,导致了加热管的表面传热系数发生改变。

为了找出折流板螺距以及气体质量流量对加热管表面传热系数的影响,本文利用 ANSYS 软件对螺距为 50、110、160、210 mm 的螺旋折流板加热器进行了不同气体质量流量下的数值模拟,表 1 为加热器的基本结构参数,图 1 为加热器的模型图,图 2 为加热器的实物图,最终得到了 4 种不同螺距的加热器在 6 种质量流量下共计 24 组的模拟数据,表 2 为螺距与螺旋角及螺旋圈数的对应关系,表 3 为体积流量与质量流量的对应关系。

表 1 加热器的基本结构参数

名称	大小	名称	大小或方式
壳体内径 $D$ /mm	131	加热管长度 $L$ /mm	1050
壳体外径 $D_s$ /mm	139	加热管发热段长度 $l$ /mm	1000
壳体长度/mm	1100	加热管外径 $d_1$ /mm	16
进出口内径 $d$ /mm	25.4	加热管排列方式	圆周
折流板厚度/mm	2	中心管直径 $D_c$ /mm	32

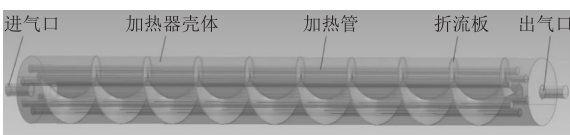


图 1 螺旋折流板加热器立体模型图

图 3 为 6 种气体质量流量下螺旋折流板加热器的加热管表面平均传热系数随螺距的变化曲线,由图 3 可知,加热管的表面平均传热系数随着折流板

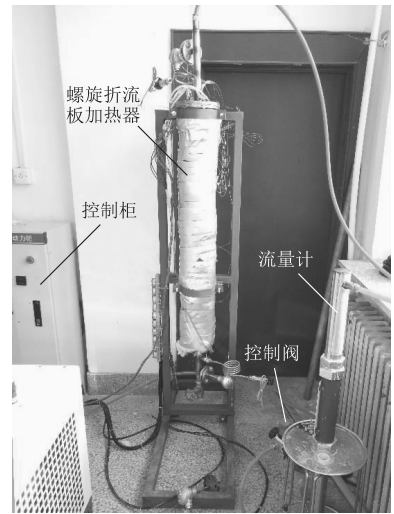


图 2 螺旋折流板加热器的实物照片

表 2 螺距、螺旋角和螺旋圈数的对应关系

螺距/mm	螺旋角/(°)	螺旋圈数/圈
H50	6.93	20.00
H110	14.96	9.09
H160	21.24	6.25
H210	27.03	4.76

表 3 体积流量和质量流量的对应关系

体积流量 $Q$ / ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	质量流量 $M$ / ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	体积流量 $Q$ / ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	质量流量 $M$ / ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )
20	0.00693	60	0.02078
30	0.01039	100	0.03464
40	0.01386	160	0.05542

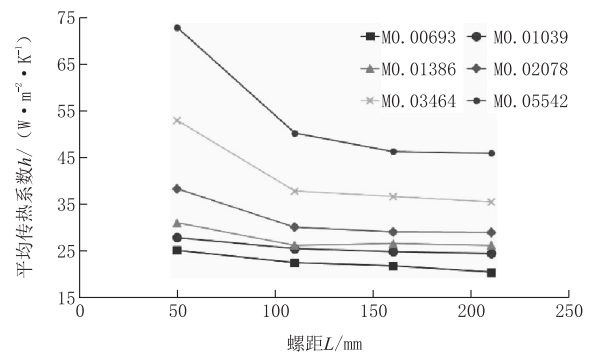


图 3 加热管表面平均传热系数随螺距的变化曲线

螺距的减小而逐渐升高,且升高的趋势逐渐加剧,以质量流量  $M_s = 0.05542 \text{ kg/s}$  的曲线为例,当螺距从 210 mm 降至 160 mm 时,平均传热系数增长了 0.8%,当螺距从 160 mm 降至 110 mm 时,平均传热系数增长了 8.5%,而当螺距从 110 mm 降至 50 mm 时,平均传热系数增长了 45.2%。可见在加热器长度相等的条件下,随着螺距的减小,折流板回旋次数增加,导致气体在加热器内部的回转次数增加,气体受

热更加充分,也就是说气体能从加热管表面带走更多的热量,进而使得加热管表面的传热系数增高。

## 2 气体质量流量对加热管表面传热系数的影响

图4为4种加热器的加热管表面平均传热系数随气体质量流量的变化曲线。从图4可看出,加热管的表面平均传热系数随着气体质量流量的升高呈线性增长。对比质量流量  $M_s=0.01386 \text{ kg/s}$  到  $0.03464 \text{ kg/s}$ , H50的加热管表面平均传热系数增长了71.3%, H110增长了44.5%, H160增长了38.2%, H210增长了35.7%,可见螺旋折流板的螺距越小,加热管表面传热系数随质量流量的增长速率越快。

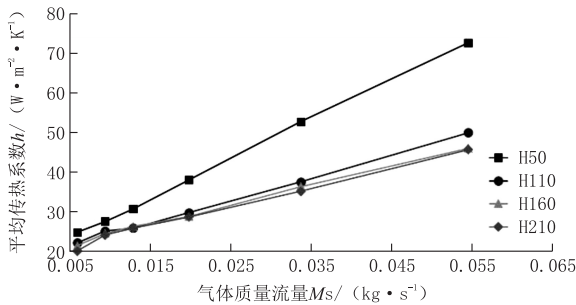


图4 加热管表面平均传热系数随气体质量流量的变化曲线

## 3 加热管表面传热系数的理论分析

### 3.1 传热系数的理论推导

公式(1)~(4)为气体粘度、导热系数、比热容和普朗特数在  $0\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$  的多项式拟合式<sup>[12]</sup>。公式(6)~(8)为壳程特征流速以及加热器壳程雷诺数的计算公式<sup>[12-14]</sup>。另外,考虑到加热器是新制造的设备,故加热器的表面污垢热阻  $R_w$  可以忽略不计,所以加热器总传热热阻公式(8)可简化为公式(9)<sup>[15]</sup>。

$$\mu = -0.00002t^2 + 0.0469t + 17.344 \quad (1)$$

$$\lambda = 0.0067t + 2.5233 \quad (2)$$

$$c^p = 0.0000007t^2 - 4 \times 10^{-5}t + 1.0058 \quad (3)$$

$$Pr = 0.0000003t^2 - 0.0002t + 0.7066 \quad (4)$$

$$t = \begin{cases} T_{in}, & (0 \leq x \leq 50 \text{ mm}) \\ T_{in} + \frac{T_{out} - T_{in}}{1050 - 50}(x - 50), & (50 \text{ mm} \leq x \leq 1050 \text{ mm}) \\ T_{out}, & (1050 \text{ mm} \leq x \leq 1100 \text{ mm}) \end{cases} \quad (5)$$

$$u = M_s / (\rho A_{min}) \quad (6)$$

$$Re = d_e u \rho / \mu \quad (7)$$

$$1/k = 1/h + R_w \quad (8)$$

$$h = K = P_e / (A_0 \Delta t_{im}) \quad (9)$$

式中: $\mu$ ——空气动力粘度,  $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\lambda$ ——导热

系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $c^p$ ——比热容,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $Pr$ ——普朗特数;  $\rho$ ——密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u$ ——壳程特征流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $d_e$ ——壳程当量直径,  $\text{m}$ ;  $K$ ——加热器的名义总传热系数;  $h$ ——加热管表面对流传热系数;  $A_0$ ——由加热管外径计算的总传热面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta t_{im}$ ——平均温差,  $^\circ\text{C}$ 。

将公式(9)、(10)带入公式(11)整理化简可得到公式(12),其相当于直线方程  $y = mx + b$ 。其中,  $x = \ln(Re)$ ,  $y = \ln[(kd_e/\lambda)Pr^{-1/3}]$ ,  $b = \ln C$ ,利用函数的曲线拟合求  $m$  和  $C$ ,进而求得  $Nu$  和  $h$ <sup>[15]</sup>。如表4所示为  $M_s=0.01386 \text{ kg/s}$  时的一组求解公式。

$$h = \lambda Nu / d_e \quad (10)$$

$$Nu = C Re^m Pr^{1/3} \quad (11)$$

$$\ln[(kd_e/\lambda)Pr^{-1/3}] = m \ln(Re) + \ln C \quad (12)$$

表4  $m$ 、 $C$ 、 $Nu$  和壳程加热管表面传热系数

螺距 $L/\text{mm}$	加热管表面传热系数 $h/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
50	$h = 3.166 \times 10^{-6} (\lambda/d_e) Re^{1.1259} Re^{1/3}$
110	$h = 1.095 \times 10^{-5} (\lambda/d_e) Re^{1.102} Re^{1/3}$
160	$h = 5.422 \times 10^{-6} (\lambda/d_e) Re^{1.231} Re^{1/3}$
210	$h = 7.795 \times 10^{-6} (\lambda/d_e) Re^{1.2182} Re^{1/3}$

### 3.2 传热系数的综合评价

将已有加热器的实验测试数据代入传热系数拟合公式得到如图5所示的加热管表面平均传热系数随螺距的变化曲线,从图中可以看出3种质量流量下的加热管表面平均传热系数都随着螺距  $L$  的减小而逐渐升高,且质量流量越大加热管表面的平均传热系数的增幅越大,这与数值模拟所得到曲线特征相吻合(图3)。与实验数据的拟合曲线相比,数值模拟曲线的误差约为20%,直接验证了数值模拟的准确性。同时,由图5曲线可以得到平均传热系数随螺距变化的拟合公式如表5所示。

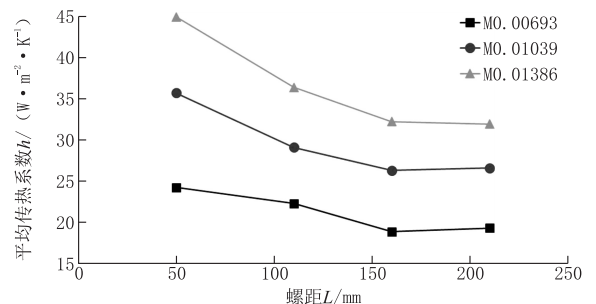


图5 加热管表面平均传热系数随螺距的变化曲线

图6为代入实验测试数据后得到的加热管表面平均传热系数随气体质量流量变化的曲线,从图6可看出加热管表面的平均传热系数随着气体质量流量

表 5 加热管表面平均传热系数  $h$  随螺距变化的拟合公式

质量流量 $M/$ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	体积流量 $Q/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	加热管表面平均传热系数 $h/$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
0.00693	20	$h=0.0002L^2-0.0772L+27.922$
0.01039	30	$h=0.0005L^2-0.1988L+44.258$
0.01386	40	$h=0.0006L^2-0.2485L+55.748$

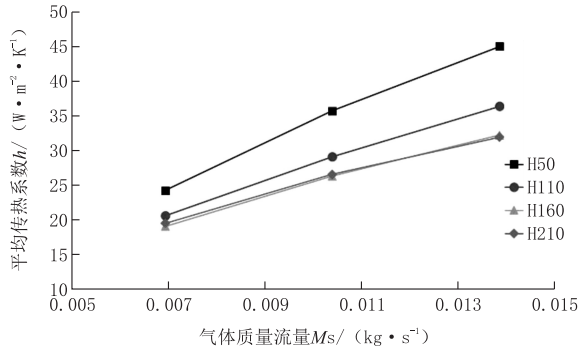


图 6 加热管表面平均传热系数随质量流量的变化曲线

的升高呈线性增长,螺距越小,增长速度越快。当通入气体的质量流量  $M_s=0.01386 \text{ kg/s}$  时,与  $M_s=0.00693 \text{ kg/s}$  相比,H50 增长了 85.39%,H110 增长了 76.30%,H160 增长了 68.93%,H210 增长了 63.44%,这种增长趋势的差异随着通入气体的质量流量的增加而逐渐显著,这也与数值模拟得到的曲线特性相吻合(图 4)。与实验数据的拟合曲线相比,数值模拟曲线的误差约为 15%,这也直接验证了数值模拟结果的准确性。同时,由图 6 曲线可得到平均传热系数随气体质量流量变化的拟合公式(见表 6)。

表 6 加热管表面平均传热系数随气体质量流量变化的拟合公式

螺距 $L/\text{mm}$	加热管表面平均传热系数 $h/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
50	$h=2985.9M_s+3.9052$
110	$h=2269.5M_s+5.0891$
160	$h=1896.3M_s+6.1466$
210	$h=1786.6M_s+7.4246$

综上所述,可以看出在对油页岩原位转化加热器进行设计时,应尽量将加热器结构参数中的螺距减小,以得到更高的加热管表面传热系数,而对于工艺参数中的气体流量,也应尽量将其质量流量提高,以获得更好的传热性能,进而减少加热管因换热受阻而导致的局部高温现象,间接提高了加热器的使用寿命。

## 4 结论

(1)螺旋折流板加热器的加热管表面传热系数较传统加热器更高,且变化趋势更加平稳,换言之,螺旋折流板加热器具有更高的热效率。

(2)对比加热管表面平均传热系数随螺距变化的模拟结果,可见减小折流板的螺距能显著地提高加热管表面的传热系数,并且随着螺距的减小,其升高趋势逐渐加剧,可见在对加热器的结构参数进行选择时,应尽量选取较小的螺距以获得更高的传热系数。

(3)对比加热管表面平均传热系数随质量流量变化的模拟结果,可见加热管表面传热系数随质量流量呈线性增长,并且螺距越小,其增长速率越快,可见在对加热器的工艺参数进行选择时,应尽量选择较大的气体质量流量以获得更高的传热系数。

(4)通过理论推导,得出了加热管表面的平均传热系数随螺距及气体质量流量变化的拟合方程,通过对比数值模拟的结果曲线和理论推导的结果曲线,可见两者有着很高的一致性,直接验证了数值模拟结果的准确性。

(5)考虑到实际工程中较小的螺距会产生较高的壳程压力降,进而造成能量损失,同时过高的质量流量会降低出口处的气体温度,导致加热后的气体无法达到油页岩原位裂解的温度要求,故后续研究应将壳程压力降和出口温度考虑在内,以便对加热器的加热性能进行综合评价。

## 参考文献:

- [1] 钱家麟,尹亮.油页岩:石油的补给能源[M].北京:中国石化出版社,2008.
- [2] 刘招君,董清水,叶松青,等.中国油页岩资源现状[J].吉林大学学报:地球科学版,2006,36(6):869-876.
- [3] 汪友平,王益维,孟祥龙,等.美国油页岩原位开采技术与启示[J].石油钻采工艺,2013,35(6):55-59.
- [4] 赵阳升,冯增朝,杨栋,等.对流加热油页岩开采油气方法.中国专利,200510012473[P].2005-10-05.
- [5] 刘德勋,王红岩,郑德温,等.世界油页岩原位开采技术进展[J].天然气工业,2009,29(5):128-132.
- [6] 李隽,汤达祯,薛华庆,等.中国油页岩原位开采可行性初探[J].西南石油大学学报:自然科学版,2014,36(1):58-64.
- [7] 太原理工大学.高温烃类气体对流加热油页岩开采油气的方法:中国,E21843/24,200710139353.X[P].2006-09-06.
- [8] 孙可明,赵阳升,杨栋.非均质热弹性损伤模型及其在油页岩地下开发热破裂分析中的应用.岩石力学与工程学报[J].2008,27(1):42-52.
- [9] 钱家麟,王剑秋.世界油页岩发展近况[J].中外能源,2007,12(1):7-11.
- [10] 郭威,孙中瑾,李强,等.一种油页岩地下原位电加热器:中国,201521007560.6[P].2015-12-08.
- [11] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [12] 陶文铨.数值传热学(第2版)[M].陕西西安:西安交通大学出版社,2001.
- [13] 王明超.三分螺旋折流板加热器流动和传热性能研究[D].江苏南京:东南大学,2016.
- [14] 孙中瑾.连续型螺旋折流板式井中电加热器的数值模拟及室内实验研究[D].吉林长春:吉林大学,2017.