

高压工频热解扶余油页岩的温度场模拟

赵 帅, 孙友宏, 刘世畅, 李 强
(吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘 要: 利用高电压工业频率电流加热油页岩,可以在油页岩内部形成等离子体的通道,利用产生的等离子体与导电通道碳化的内表面对油页岩进行加热,实现油页岩的原位裂解. 本文采用有限元分析软件建立油页岩三维耦合模型,通过数值计算获得高压工频裂解油页岩的温度场分布. 在电压为1 000 V,工业频率电流为5 A时加热6 min,油页岩电极中心部位的温度达到597 ℃,在电极附近30 mm范围内,温度达到347 ℃,满足油页岩裂解需求;随电流的增加,相同时间内油页岩被有效加热的温度增加,并且有效热解的范围增大. 从数值模拟结果分析可知,高电压工业频率电流加热裂解油页岩技术,升温速率快,能量有效利用率高.

关 键 词: 高电压;工频电流;油页岩;传热模拟;热电耦合模拟

中图分类号: P 618.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)03-0414-06

Temperature Field Simulation of Fuyu Oil Shale Pyrolysed by High Voltage Industrial Frequency Technology

ZHAO Shuai, SUN You-hong, LIU Shi-chang, LI Qiang
(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China. Corresponding author: LI Qiang, E-mail: liqiangjlu@163.com)

Abstract: Using the high voltage industrial frequency current to heat oil shale, the plasma channels can be formed in oil shale. The in-situ cracking of oil shale is realized by heating the oil shale with the generated plasma and the carbonized inner surface of the conductive channel. In this paper, a three-dimensional coupled model of oil shale was established by finite element analysis software, and the distribution of temperature field during the high frequency oil shale pyrolysis was obtained by numerical calculation. When the voltage is 1 000 V and the current is 5 A, the temperature at the center of electrode, after 6 minutes heating, reached 597 ℃, and the temperature at the areas around the electrode 30 mm away reached 347 ℃, meeting the pyrolysis demand of oil shale. With the increase of current, the increased temperature of oil shale during the same heating time showed a steady rise, and the range of effective pyrolysis also went up. According to the results of numerical simulation, using the high voltage industrial frequency to heat oil shale can gain a fast heating rate and high energy efficiency.

Key words: high voltage; industrial frequency current; oil shale; heat transfer simulation; coupled thermal and electric simulation

化石能源的急剧消耗引起非常规能源如油页岩等的迅猛发展^[1]. 中国东北地区油页岩资源储量丰富,但具有储层很薄、品位较低、埋深较深,进行地表干馏污染严重且成本过高,会使得经济效益很低的特点. 虽然油页岩原位裂解技术可以避免地面干馏造成的污染等缺点,但是地下原位裂解面临升温速率慢,能量有效利用率低的问题^[2-4]. 高压工频原位裂解油页岩技术,是采用高压电击穿油页岩形成等离子体通道,然后改用工频电通过等离子体通道碳化的内表面加热油页岩产生油气的过程^[5]. 这个过程油页岩升温迅速,能量有效利用率高,并且采用原位裂解的方式减

少对环境的污染,但是传热传质十分复杂,主要涉及到电场、温度场、流场和应力场的相互作用. 电场能量的输入对热传导起到决定作用,而油页岩温度场的分布又影响油页岩的介电常数和电阻率,因此采用热电耦合分析的手段对高压工频热解油页岩技术进行传热传质模拟,更贴近于实际的工况条件,可以更清晰地解释高压工频热解油页岩的过程.

以往对于油页岩传热传质的研究主要表现在采用稳态的传热模型和热解动力学^[6-8],如 Ma 等^[5]建立一维稳态传热模型,对龙口油页岩的热传导进行模拟,并在数学推导的基础上得到了解析表达式,发现导热系数是温度的多项式函数. Simonov 等^[9]采用一阶传热模型模拟岩石孔隙度和岩石基质之间的传热过程. Xia 等^[10]建立两级干燥模型,模拟柳树河油页岩在流化床干燥器中的传热传质. Gennady 等^[11]建立数学模型采用 Galoter 技术热处理油页岩,表明在单颗粒油页岩的传热传质过程中,二次反应减少油页岩的产量. Sun 等^[12]采用热电耦合模型对镁电解槽的热平衡进行分析,获得温度分布,并且随着电流强度的

变化,必须保持相应的电解质深度,以保持热平衡. Berna 等^[13]研究了微波辐射传热对油收率的影响,表明油页岩的油收率不仅与热解温度有关,而且与温度保持时间有关,但是对传热的表述较少. Nicolas 等^[14]油页岩是各向异性体,干酪根在油页岩内的分布是不规则的,利用单一的物理场对油页岩的传热传质进行模拟,模拟的结果虽然不会有显著的差异,但是理论计算与建模方式不够精确,也不够严谨. 为了体现加热过程中多种物理场相互作用相互影响,本文采用有限元分析软件建立三维模型,并应用热电耦合的分析方式对高压工频裂解油页岩的传热进行分析,探究高压工频裂解扶余油页岩的可行性.

1 数值模拟

1.1 油页岩样品

本文采用的扶余油页岩,选自松辽盆地扶余-长春岭地区 FK-3 井 466~487 m 层段,选取不同深度的油页岩样品两组,进行工业分析、元素分析、含油率测试,测试结果如表 1 所示.

表 1 扶余油页岩工业分析与元素分析
Table 1 Proximate and element analysis of Fuyu oil shale

深度 H/m	工业分析			含油率分析				元素分析			
	$w_{\text{水分}}/\%$	$w_{\text{灰分}}/\%$	$w_{\text{挥发分}}/\%$	$w_{\text{固定碳}}/\%$	$w_{\text{含油率}}/\%$	$w_{\text{含水率}}/\%$	$w_{\text{半焦}}/\%$	$w_{\text{H}}/\%$	$w_{\text{C}}/\%$	$w_{\text{N}}/\%$	$w_{\text{S}}/\%$
466	3.68	70.07	20.99	3.68	3.97	5.36	89.08	7.632	5.76	0.29	0.975
481	3.75	68.71	21.37	3.75	4.16	5.85	86.47	7.271	4.96	0.34	1.094

制备垂直于层理和平行于层理的扶余油页岩样品各 10 组,分别测定在不同温度下的导热系

数、比热容、介电常数和电阻率,如表 2 所示.

表 2 扶余油页岩热物理性质与电性质
Table 2 Thermophilically properties and electrical properties of Fuyu oil shale

$t/^\circ\text{C}$	各向异性常数	介电常数 $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$	导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$		电阻率 $\Omega\cdot\text{m}$		比定压热容 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
			平行 层理	垂直 层理	平行 层理	垂直 层理	
25	1.19	1.12e-10	0.615 5	0.509 5	0.88e8	1.60e8	2 206.0
150	1.22	0.93e-10	0.695 1	0.550 6	1.50e6	0.91e7	2 004.0
250	2.16	1.00e-10	0.406 8	0.328 2	0.88e6	1.10e7	1 733.0
350	1.24	1.14e-10	0.363 7	0.336 9	0.20e6	1.00e7	970.7
450	1.37	0.80e-10	0.356 8	0.332 0	0.50e5	0.80e6	1 187.0
520	1.68	1.40e-10	0.232 4	0.217 7	0.20e4	0.77e5	1 033.0
550	1.58	1.60e-10	0.208 8	0.179 7	1 000	0.24e4	764.0
600	1.40	1.25e-10	0.184 5	0.163 3	600	1 000	738.2
700	1.49	1.15e-10	0.156 4	0.153 1	100	100	365.4
750	1.37	1.10e-10	0.157 3	0.154 0	0.1	0.1	353.0

1.2 模型与参数

根据高压工频电加热油页岩的原理,采用 Inventor 建立高压电击穿扶余油页岩的三维模型,并完成三维四面体网格划分,在电极附近网格加密,如图 1 所示;将完成网格划分的 mesh 文件导入 ANSYS Workbench 的 Thermal – electric 模块进行热电耦合分析,模型规格见表 3.

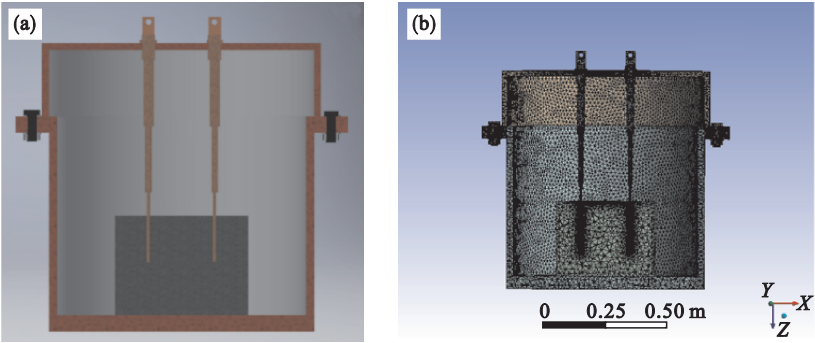


图 1 三维建模与网格划分
Fig. 1 Building 3D models and mesh generation
(a)—击穿模型; (b)—网格划分.

采用熔沸点较高、导电性能更好的石墨电极作为击穿电极,更有利于击穿试验. 石墨是均匀导电、导热的各向同性体,在不发生相变时导热系数为 $151\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,介电常数为 1.5 F/m ,电阻率为 $0.001\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,比热容为 $700\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 理论计算分析

通入工频电计算油页岩内温度分布,采用傅里叶定律获得热流密度. 首先要获得油页岩在给定边界条件下的温度分布. 在工频电加热的初期,此时属于稳定条件下无内热源产生的导热情况;在通入高压电作用时,在电极端部形成小的电弧,由于电极与油页岩无限接近,因此通道的导热模型近似为圆柱形,采用圆柱坐标系建立热扩散方程^[15]:

$$\frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial t}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau}.$$

(1)

式中: r 为径向距离,mm; ϕ 为电极夹角, $^{\circ}$; ρ 为油页岩密度, kg/m^3 ; c_p 为油页岩比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$.

当加热一段时间之后,电极附近的温度首先升高,通过触发油页岩内局部的化学反应,干酪根裂解产生热量,使用反应热和工频电加热一起促进油页岩内干酪根的热裂解^[10]. 此过程属于具有内热源的稳定条件下的导热方程:

表 3 油页岩与电极规格		
Table 3 Specification of oil shale and electrode		
属性	油页岩	石墨
直径/mm	200	5
高度/mm	200	100
电极间距/mm	—	100

$$\frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \times \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q = \rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau}.$$

(2)

式中, q 为单位时间内干酪根裂解释放的热量,J. 在干酪根裂解以后,由工频电加热传导单位时间内进入单位体积油页岩内的热量的导热速率,与单位体积内油页岩裂解化学键断裂而释放的反应热的导热速率之和,即为油页岩内热量的传导速率. 根据传热学 Neumann 边界条件,高压短脉冲电击穿油页岩之后,工频电加热油页岩的初期,工频电对油页岩施加的电加热是在稳定的条件下($1\,000\text{ V}$, $1\sim5\text{ A}$)执行的,该状态处于高压短脉冲击穿与工频电加热的过渡状态,热流密度由工频电的电压与电流决定,因此在 $r=0$ 处的热流密度为常数:

$$-k \frac{dt}{dr} \Big|_{r=0} = q_{s2}.$$

(3)

通道近似为圆柱形,两个电极的电势不同,所以两个电极之间可以形成无数条导电通道,导电通道对油页岩的热传导系统近似为径向系统,击穿容器的初始状态为常温常压,设定边界条件为

$$t_{(r=0)} = t_{s1}; t_{(r=L)} = t_{s2}.$$

(4)

式中: t_{s1} 为等离子体通道的温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{s2} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

如图 2 所示,由于电极附近的温度首先升高,促使油页岩内局部发生化学反应,干酪根裂解产生反应热,存在内热源,所以对于工频电加热的油

页岩径向系统,有

$$\frac{1}{r} \times \frac{d}{dr} \left(r \frac{dt}{dr} \right) + q = 0 . \tag{5}$$

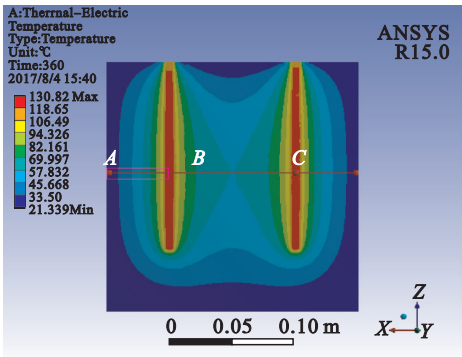
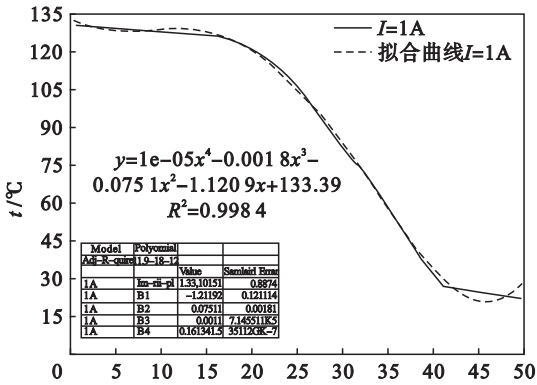
假定油页岩内干酪根的分布是均匀的,因此内热源是均匀分布的,即

$$r \frac{dt}{dr} = - \frac{q}{2k} r^2 + c_1 , \tag{6}$$

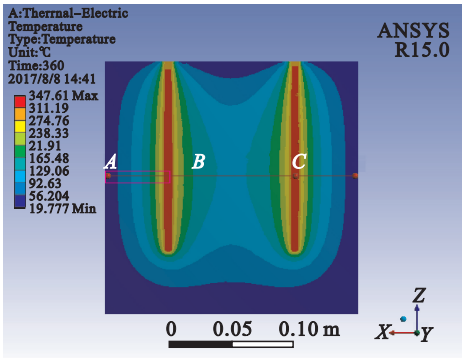
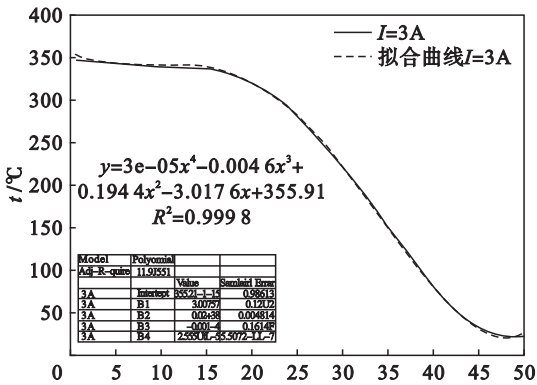
$$t_{(r)} = - \frac{q}{4k} r^2 + c_1 \ln r + c_2 , \tag{7}$$

$$\frac{dt}{dr} \Big|_{r=0} = t_{s1} , \tag{8}$$

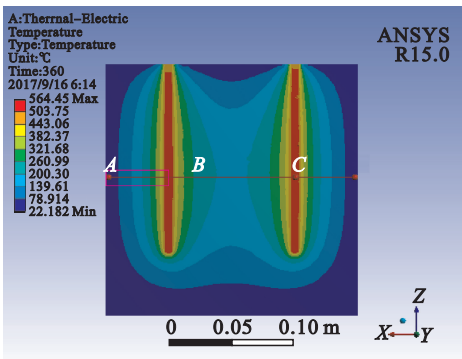
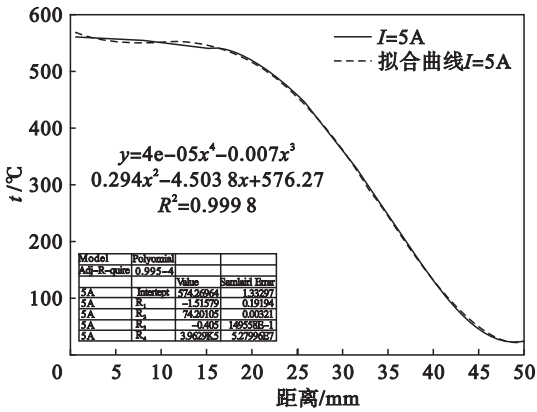
$$\frac{dt}{dr} \Big|_{r=L} = t_{s2} . \tag{9}$$



(a)



(b)



(c)

图 2 油页岩内温度监测曲线与温度云图

Fig. 2 Temperature monitoring curves and cloud picture in oil shale

(a)— $I=1\text{ A}$; (b)— $I=3\text{ A}$; (c)— $I=5\text{ A}$ (左侧温度监测曲线来自温度云图 CB 段)。

由此可见,温度在油页岩内是沿着电极对称分布的:

$$c_1 = 0 , \tag{10}$$

$$c_2 = t_{s2} + \frac{q}{4k} L^2 . \tag{11}$$

所以在工频电加热的作用下,油页岩内部温

度的分布为

$$t_{(r)} = \frac{q}{4k} r^2 \left(1 - \frac{r^2}{L^2} \right) + t_{s2} . \tag{12}$$

2.2 数值模拟分析

在模型中采用两点法设置温度监测曲线,设计扶余油页岩的加热电压为 $1\ 000\text{ V}$,分别采用不

同的电流加热油页岩. 由于任意电极距离油页岩边界的距离均为 50 mm, 为了验证理论计算的结果, 因此截取电极任意一侧的数据采用多项式拟合, 再将获得的温度拟合曲线与理论计算对比. 如图 2 所示, 左侧图中黑色曲线代表电极任意一侧 (CB 段) 温度检测曲线上的数据, 红色曲线为多项式拟合的结果; 其中温度监测曲线为右侧图中 C, B 两点之间的线段, 红色矩形框内数据即为拟合数据的来源.

根据油页岩内温度分布的拟合曲线显示, 油页岩内温度的分布是满足以电极为原点, 与半径 r 相关的四次多项式. 当选择工频电流为 1 A 时, 加热 360 s 电极温度 130.82 $^{\circ}\text{C}$, 有效加热区域局限于电极周围 20 mm 范围内, 温度较低, 不足以引起油页岩内部干酪根的裂解; 继续施加电流至 3 A, 电极温度升至 347.61 $^{\circ}\text{C}$, 仍然不能引起干酪根的裂解; 当加热电流增加至 4 A, 电极温度达到

457.51 $^{\circ}\text{C}$, 在电极周围 20 mm 内温度达到 356.67 $^{\circ}\text{C}$, 该范围内的干酪根开始裂解; 当加热电流增加至 5 A 之后, 加热电极附近油页岩温度达到 597 $^{\circ}\text{C}$, 在电极周围 30 mm 内温度达到 347 $^{\circ}\text{C}$, 但是两电极之间仍有部分油页岩未能达到裂解温度.

在加热电压为 1 000 V 的情况下, 分别设置不同的电流 1 ~ 5 A, 将油页岩中设置的温度监测曲线 AB 的数据导出, 如图 3 所示. 结合温度云图与电极任意一侧的温度拟合曲线可以获得油页岩的温度以电极为对称轴对称分布, 与式 (12) 的理论计算结果吻合.

此外, 当采用不同电流的工频电加热时, 电流越大, 电极温度上升得越快, 油页岩的升温速率越高, 如图 4 所示. 当电流低于 4 A 时, 在 360 s 内无法有效热解油页岩; 当电流为 4 A 时, 加热 300 s 后, 电极周围 25 mm 范围内的油页岩可以被有效

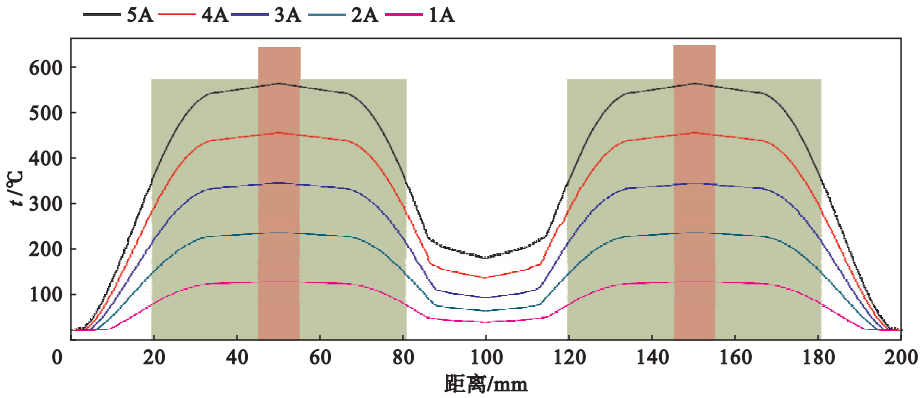
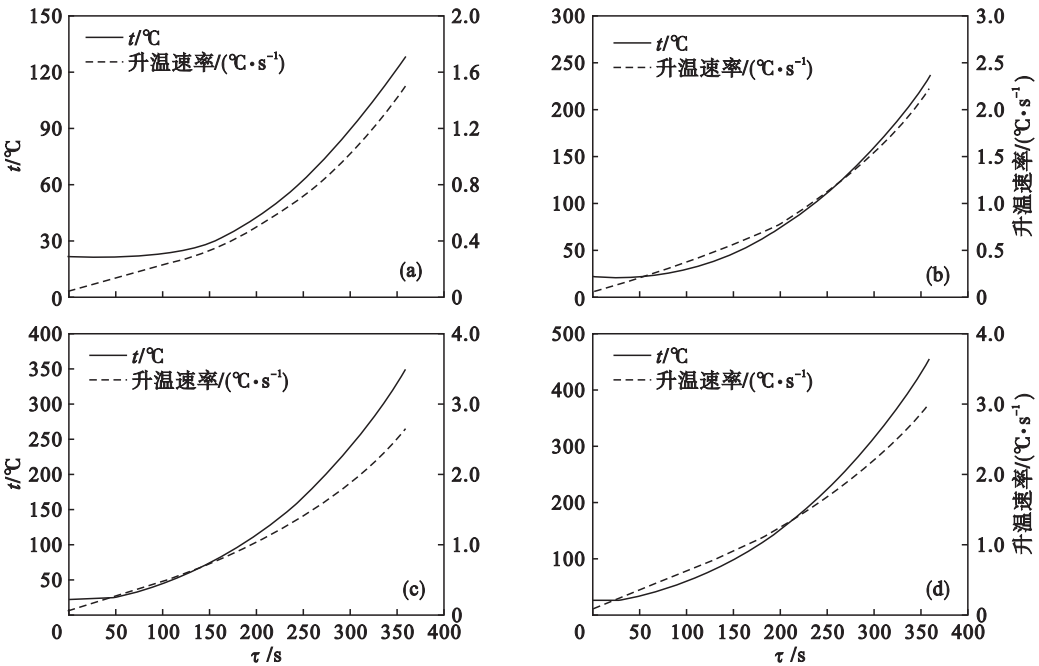


图 3 油页岩内监测曲线上温度的分布
Fig. 3 Temperature distribution on the monitoring curve in oil shale



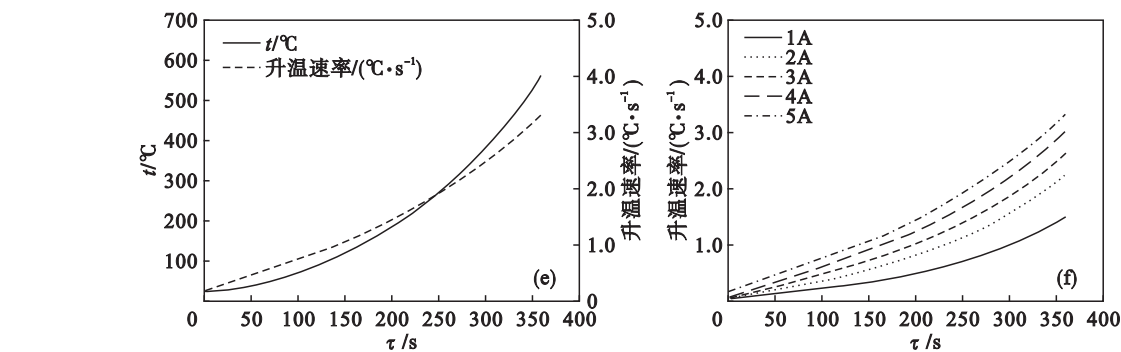


图 4 不同电流下油页岩的温度与升温速率
Fig. 4 Temperature variation and heating rate of oil shale under different current
(a)— $I=1\text{ A}$; (b)— $I=2\text{ A}$; (c)— $I=3\text{ A}$; (d)— $I=4\text{ A}$; (e)— $I=5\text{ A}$; (f)—升温速率.

热解;当电流大于 4 A 时,加热 250 s 以后就可以使电极周围 30 mm 内的油页岩达到裂解温度.

3 结 论

1) 在高电压击穿-工频加热裂解油页岩的过程中,温度场与电场共同作用互相影响,根据扶余油页岩的热物理性质与电性质的测试结果,温度升高油页岩的电阻率降低,介电常数有所增加.采用热电耦合的分析方式,能较为准确地预测油页岩热裂解过程中温度的分布规律.

2) 当扶余油页岩采用 1 000 V 工业频率电流 5 A 加热至 360 s 时,电极中心部位的温度为 597 $^\circ\text{C}$,略高于边缘 384 $^\circ\text{C}$,各部分之间的温度分布更加均匀,能够满足干酪根的裂解条件,温度差距也逐渐减小.

3) 与常规的油页岩热解技术相比,高压工频热解油页岩的技术可以极大地缩短油页岩热解的时间.工频电加热油页岩,没有能量的多级转换,能量有效利用率高,能够更快地达到干酪根裂解温度.

参考文献:

[1] 冯雪威,陈晨,陈大勇.油页岩原位开采技术研究新进展[J].中国矿业,2011,20(6):84-87.
(Feng Xue-wei, Chen Chen, Chen Da-yong. New development of oil shale in-situ technology [J]. China Mining Magazine, 2011, 20(6): 84-87.)
[2] Sun Y H, Bai F T, Liu B C, et al. Characterization of the oil shale products derived via topochemical reaction method[J]. Fuel, 2014, 115: 338-346.
[3] 杨阳. 高压工频电加热原位裂解油页岩的理论与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
(Yang Yang. Theoretical and experimental research of oil shale in-situ pyrolysis by high voltage-power frequency electrical heating method [D]. Changchun: Jilin

University, 2014.)
[4] Sun Y H, Bai F T, Lyu X S, et al. A novel energy-efficient pyrolysis process: self-pyrolysis of oil shale triggered by topochemical heat in a horizontal fixed bed [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 1-8.
[5] Ma Y, He L, Li S Y, et al. Heat transfer of oil shale in a small-scale fixed bed [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 124(1): 461-469.
[6] Wang F, Cao Y D, Wang G Q. Thermoelectric generation coupling methanol steam reforming characteristic in microreactor [J]. Energy, 2015, 80(2): 642-653.
[7] Wang X D, Huang Y X, Cheng C H, et al. A three-dimensional numerical modeling of thermoelectric device with consideration of coupling of temperature field and electric potential field [J]. Energy, 2012, 47(1): 488-497.
[8] Zhang F, Jack C P. An efficient modeling approach to simulate heat transfer rate between fracture and matrix regions for oil shale retorting [J]. Transport in Porous Media, 2010, 84(1): 229-240.
[9] Simonov V F, Mrakin A N, Selivanov A A, et al. Development of an algorithm for calculating the parameters of a drum reactor for low-temperature carbonization of oil shale with ash-based heat-transfer agent [J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2017, 52(9/10): 675-681.
[10] Xia L Z, Zhang H C, Wang B H, et al. Experimental and numerical analysis of oil shale drying in fluidized bed [J]. Drying Technology, 2017, 35(7): 802-814.
[11] Gennady G, Eduard V. Modeling study of oil shale pyrolysis in rotary drum reactor by solid heat carrier [J]. Fuel Processing Technology, 2015, 139: 108-116.
[12] Sun Z, Liu C L, Lu G M, et al. Coupled thermoelectric model and effects of current fluctuation on thermal balance in magnesium electrolysis cell [J]. Energy & Fuels, 2011, 25(6): 2655-2663.
[13] Berna H C, Serhat A. Recovery of turkish oil shales by electromagnetic heating and determination of the dielectric properties of oil shales by an analytical method [J]. Energy & Fuels, 2008, 24(1): 503-509.
[14] Nicolas P K, Aldo S F. Solar-driven coal gasification in a thermally irradiated packed-bed reactor [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(3): 2043-2052.
[15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2010: 41-82.
(Yang Shi-ming, Tao Wen-quan. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2010: 41-82.)