油气资源(

天然气水合物加热开采机理及数学模型

王计堂, 张晓梅

(山西煤炭职业技术学院,山西太原 030031)

[摘 要]在目前已有的主要水合物开采方法研究的基础上,进一步研究了天然气水合物加热开采 法的机理。研究认为,水合物是加热分解、热传导和含化学分解的液、气两相渗流流动,它们之间既相互 独立,又相互联系。并将水合物区划分为分解区和未分解区,将分解区前缘作为可移动的分界面,分区 建立了加热分解热传导数学模型及含分解化学反应的液、气两相渗流流动数学模型,为加热开采水合物 气层过程进行深入研究奠定了基础。

[关键词]天然气水合物 加热开采 数学模型 加热分解 [中图分类号]TE319 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2012)01-0185-6

Wang Ji-tang, Zhang Xiao-mei. Mechanism of heating exploitation for natural gas hydrates and its mathematical models [J]. Geology and Exploration, 2012, 48(1):0185-0190.

1 引言

天然气水合物是水和天然气(主要是甲烷)在 高压低温条件下形成的类冰状结晶物质。每立方 米体积的水合物可释放 164 m³ 的甲烷。天然气水 合物广泛存在于永冻地带区域和水深大于 300 m 的海底、湖底的浅地层中。全世界目前发现有天 然气水合物存在标志或实物样品的地点有 116 处,包括我国南海海域、东海海域、台湾东部海域 和青藏高原四处(Millkoy A,2000)。地球上水合 物中甲烷的总蕴藏量达到 2000 万亿 m³,相当于全 球煤、石油、天然气已知储量总和的甲烷当量的二 倍(Collett T S,2002),被认为是 21 世纪最有开发 前景的接替能源。

由于天然气水合物是在低温(<10℃)和高压(> 10 MPa)条件下形成,并保持稳定状态,以固体形式 存在于岩石的裂缝、粒间空隙中,或以球粒状散布于 细粒的岩石中或存在于深海底的沉积物中。因此, 天然气水合物的开发技术不同于煤、石油、天然气等 资源的开发技术。目前,天然气水合物的开采主要 倾向于将其在原地分解,然后通过传统的油气开发 技术将分解出来的天然气采离地面或海面(赵生 才,2002)。从 20 世纪 70 年代末开始,围绕打破天 然气水合物稳定的相平衡条件促使其分解,陆续提 出了加热法、降压法和注入化学试剂法等。但目前 为止,这些天然气水合物开采方法还处于理论与实 验研究阶段,均没有在实际中得到有效的应用 (Holder G D A,1982),见表1。

加热法是通过加热使储层温度达到水合物分 解温度,从而分解出天然气,它需要消耗大量热 量:化学法效果缓慢,费用十分昂贵,不宜在大规 模开采天然气水合物中使用:降压法是通过降低 天然气水合物储层压力,分解出天然气,达到开采 目的,其特点是经济、简便易行。但水合物储层渗 透率甚低,如水合物层下无自由气体时,难以达到 降低储层压力来破坏水合物平衡条件,分解出天 然气。因此,需要采用加热法、化学法使水合物气 层分解,形成自由气层,再采用降压法开采。在储 层温度接近或低于 0°C 时分解出来的水将由于降 压法造成储层降温,将使分解出来的水结冰堵塞 储层,不能采用(许虹等,2005)。经过长期研究, 特别是前苏联密索亚哈气田,通过开采下部自由 气层使水合物气层降压开采的实践和 2002 年美、 日、加、德、印五国在加拿大通过"Millk 2002"项目

[[]收稿日期]2011-06-17;[修订日期]2011-09-26;[责任编辑]郝情情。

[[]第一作者]王计堂(1963年—),男,1985年毕业于山西矿业学院,硕士学位,副教授,高级工程师,现主要从事煤矿地质及水文地质教学 与研究。E-mail;wjt1963@126.com。

进行的短时期的降压法、加热法开采试验,认为单一的加热法和降压法不是将来大规模开采水合物 的有效方法,只有将加热法和降压法有机结合才 是将来大规模开采水合物气层的最佳方案(祝有 海,2006),特别是加热法适应不同水合物气层开 发,还可以研究新的加热技术,从而提高热效率、 减少热损失,因而加热法是有很好发展前景的水 合物开采方法,因此,本文在已有的研究基础上进 一步对加热开采水合物的机理进行研究。

2 天然气水合物的加热开采机理

由于天然气水合物以固体形式存在于岩层裂 缝、孔隙及分布于岩石体内和海底堆积物中,不能流 动和渗透。因此在当前技术条件下,首先在原地将 其分解为能渗透和流动的水和天然气,然后采用传 统天然气开采技术将天然气采出,其分解过程,用以 下化学反应式表示

$$G \cdot n_{\mu} \mathrm{H}_{2} \mathrm{O} \to n_{\mu} \mathrm{H}_{2} \mathrm{O} + G \tag{1}$$

其中:*G* 表示天然气气体分子, n_H 表示原水合物分 子中所含水分子数。

根据水合物结构不同,*n_H*理论值分别为 I 型结 构为 5.75, II 型结构为 5.65,实际上取 6.3~6.6之 间。

天然气水合物要在一定压力和温度条件下才能 稳定存在,即满足相平衡条件,如图1。曲线上部代 表水合物稳定存在的区域,右边及下边是水合物不 稳定存在的区域,要水合物分解,必须破坏其稳定相 平衡,使水合物难以稳定存在。加热法是改变储层 温度条件,使其超过该压力下的临界分解温度,导致 水合物的相平衡破坏,分解为水和天然气。

表1 天然气水合物开采数学模型比较(张柳等,2010)

Table 1 Comparison of mathematical models for exploitation of natural gas hydrates (after Zhang et al., 2010)

模型	传热	流动	分解动力 特性	抑制剂	维数	求解方法	
加热模型 降压模型	MoGuire (McGuire P L, 1982)	传导				1	解析
	Kamath 与 God bole(Kamath V A,1987)	传导				柱坐标	解析
	Jamaluddin 等(Jamaluddin A K,1989)	传导		\checkmark		1	数值
	Selim 与 Sloan(Selim M S,1990)	对流传导	气流动			1	解析
	Das 与 Srivastava(Das D K,1993)	传导				柱坐标	解析
	唐良广等(唐良广等,2005)	传导				1	解析
	Tsinpanogiannis (Tsimpanogiannis IN,2007)	对流传导	气流动			1	解析
	Bursh ears 等(Burshears M O 等,1986)	传导	气、水流动			3	数值
	Sung 等(Sung W 等,2000)		气、水流动	\checkmark		3	数值
	Goel 等(Goel N等,2001)		气流动	\checkmark		柱坐标	解析
	喻西崇等(喻西崇等,2004)	对流传导	气流动			柱坐标	解析
	Liu 等(Liu Y 等,2008)	对流传导	气、水流动			1	数值
	Liu 等(Liu Y 等,2009)	对流传导	气、水流动			柱坐标	数值
	Sun 等(Sun X 等,2005)	对流传导	气、水流动	\checkmark		1	数值
	Sun 与 M oh anty(Sun X F,2006)	对流传导	气、水流动	\checkmark		3	数值
	N azridoust 与 Ahmadi(Nazridoust K,2007)	对流传导	气、水流动	\checkmark		柱坐标	数值
	Bai 等(Bai Yu-hu 等,2009)	对流传导	气、水流动	\checkmark		3	数值
综合模型	Song与Liang(Song Yong-chen 等,2009)	对流传导	气、水流动	\checkmark		2	数值
	Swinkels 与 Drenth(Swinkels W J A M, 1999)	对流传导	气、水流动	\checkmark		3	数值
	Masuda 等(Masuda Y 等,2002)	对流传导	气、水流动	\checkmark		3	数值
	Hong 与 Darvish (Hong H,2003)	对流传导	气、水流动	\checkmark		2	数值
	Moridis 与 Collett(Moridis G J,2003)	对流传导	气、水流动	\checkmark	\checkmark	3	数值

注: $\sqrt{$ 表示模型考虑该种因素。



Fig. 1 P-T diagram of methane hydrates

天然气水合物分解需要吸收大量的能量,以破 坏水合物的晶格笼,释放出包裹在其中的天然气分 子,因此水合物分解反应为吸热反应。加热法正是 通过注入高于储层温度的外界物质,以增加储层温 度,使之达到水合物的分解温度,同时提供热量以保 证水合物的分解。分解过程包括:水合物颗粒表面 的晶格破坏、气体分子(天然气)由表面脱附(解 吸)。以上分解过程发生于固体表面,而不是固体 内部,随着分解过程的进行,颗粒缩小和减少,天然 气从固体表面释放出来,产生的气体随后进入由于 颗粒缩小和减少所形成的空间,从而形成气相主体。

在加热开采过程中,不断为储层提供热量,维持 储层温度保持在压力 P_f下的临界分解温度,并不断 提供水合物分解所需的热量,则水合物将继续分解, 在原来水合物区形成分解前缘。将原来水合物区分 为水合物分解区(简称分解区)和水合物未分解区 (即水合物区),可以视分解前缘为一个面,即为分 解区和水合物区的分界面,分界面成为分解区外边 界,水合物区的内边界(见图 2)。

分解前缘(分界面)随开采加热过程不断由内 向外推进,加热分解过程实质上是热传导过程。因 而加热分解过程是一个典型的有移动边界的热传导 过程的问题,分界面(分解前缘)就是该问题的可移 动边界。

水合物分解产生的天然气和水,脱离了固体粒 子表面而进入了储层分解区的空隙空间,成为气、液 两相渗流,通过分解区进入生产井,分解区成为渗流 流动区域。由于加热开采过程中,分解前缘随开采 过程不断移动,分解前缘实际上就是渗流区的外边 界。天然气水合物加热开采是将天然气水合物分解 为气和水的流动,也是分解前缘(水合物区与分解 区分界面)为移动边界的两相渗流流动,整个水合



Fig. 2 Schematic diagram of hydrate reservoir model

物加热开采过程,成为彼此独立、而又相互联系的有 可移动边界的热传导过程和有可移动边界的两相渗 流流动的过程。

3 天然气水合物加热开采的数学模型

天然气水合物的加热开采是通过对气层进行加 热,达到天然气水合物在气层压力下的分解温度,从 而分解为水及天然气,成为天然气、水的气液两相渗 流,流向生产井,再通过常规的天然气开采技术采 出。整个水合物加热开采过程,是有可移动边界的 水合物加热分解热传导过程和有分解化学反应的两 相渗流流动过程,本文分别对加热分解热传导过程 和气液两相渗流流动过程建立数学模型。

3.1 加热分解热传导过程的数学模型

基于水合物气藏和加热开采的特点,建立加热 开采水合物分解热传导过程,温度分布随时间变化 的数学模型。天然气水合物均匀分布在地层与气层 形成的夹层内。从开采井(r=0)到无限远处(r= ±∞)一维分布。水合物层初始温度为 T₂,在时间 t =0时,由开采井注入热流体,水合物靠边界温度升 高到 T₁,且有:T₁>T_f>T₂。在开采过程不断注热,始 终维持开采温度 T₁,在分解过程中,天然气水合物 分解发生在很狭小的区域内,可以视为一个分解面 即分解前缘,分解是瞬间接触性过程,分解产生的水 及气迅速离开水合物分解面(分解前缘),将原水合 物层分为分解区和水合物区,分解前缘又称分界面。 在加热开采过程中分解前缘始终沿着半径方向由内 向外移动,成为典型的移动边界传热问题。

不同区域内的温度场分别有如下特点:

(1) 水合物分解区的热量沿着径向远离井筒运

动,忽略该区域的对流流动传热、假定该区域的物性 参数为常数,其温度场方程为:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{\partial T_{D}(r,t)}{\partial r}\right] = \frac{1}{\alpha_{D}}\frac{\partial T_{D}(r,t)}{\partial t} \qquad (2)$$

式中: $T_p(r,t)$ 为分解区在径向 r 和时间 t 时的 温度。

初始条件:

$$T_D(r,t) = T_R t = t_{iug} \quad r_w \le r \le r_f$$
(3)
边界条件:

$$T_D(r,t) = T_f t > t_{iug} \quad r = r_f \tag{4}$$

其中

 T_f —水合物的分解温度;K(绝对温度);

 T_R —开始时储层温度/无穷远处储层温度;K (绝对温度);

 r_{w} —井的半径;cm;

 r_{f} —分解前缘的半径;cm;

 t_{ins} —注热达到 T_1 的时间;s;

 α_{p} —分解区的热扩散系数, cm²·s⁻¹。

(2) 水合物未分解区,因而没有天然气流体的 渗流作用,只有热量的传导作用,则其温度场方程为

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{\partial T_{H}(r,t)}{\partial r}\right] = \frac{1}{\alpha_{H}}\frac{\partial T_{H}(r,t)}{\partial t} \qquad (5)$$

式中: $T_{H}(r,t)$ —在时间 t 时水合物区 r 处的温度。

当 $t = t_f$ 时,初始条件为:

$$T_H(r,t) = T_R \quad r > r_f \tag{6}$$

边界条件为:

$$T_H(r,t) = T_f \quad r = r_f \tag{7}$$

$$T_H = T_R \quad r \to \infty \tag{8}$$

其中

 T_{R} —开始时储层温度/无穷远处储层温度;K

 T_f —热量达到分解前缘的时间;s

 α_{μ} —水合物区的热扩散系数 cm² · s⁻¹。

(3) 在水合物分解过程中,在分界面(移动边界)上应当满足能量守恒,即 r=r_f时,有:

$$\lambda_{D} \frac{\partial T_{D}(r,t)}{\partial r} - \lambda_{H} \frac{\partial T_{H}(r,t)}{\partial r} = \Delta H_{D} \frac{\partial r}{\partial t} t > t_{iug}$$
(9)

$$T_H = T_D = T_f \quad r = r_f \tag{10}$$

其中

方程(2)~(10)是水合物气层在加热开采过程

中加热分解的基本微分方程、边界条件和初始条件, 构成水合物加热分解热传导过程的数学模型。

3.2 加热开采气、液两相渗流流动过程的数学模型 在加热开采过程中,随着储层温度升高达到临

界分解温度,水合物将不断分解为水和天然气,离开 了分解面进入了气层孔隙空间。分解面随着水合物 分解由内向外移动,即在气层与井的压差下形成渗 流向井内流动,是一个有移动边界和分解化学反应 的气液两相渗流流动过程。为建立其相应的数学模 型,作如下假设:

(1)在气、水、水合物中,仅考虑气、水两相渗流,忽略水合物的流动;

(2)流体为气、水两相,固相为水合物,水合物 分解产生气、水,相平衡瞬间建立,不考虑气在水中 溶解,水合物的分解区加热方式;

(3)忽略岩石变形,因为天然气在多孔介质中 流动的流速远低于声速,忽略其可压缩性,将水、气 均视为不可压缩,流体渗流符合达西定律;

(4) 水合物中的天然气被视为单一的甲烷气体;

(5) 不考虑重力及毛管力;

(6) 渗流过程中温度变化忽略不计。

3.2.1 质量守恒方程

天然气水合物加热分解系统具有固相天然气水 合物、液相水和气相天然气三相三组分系统,研究 水、气向井流动采用极坐标,其质量守恒方程为:

气相:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho_g V_g)}{\partial r} + \overline{m}_g = \frac{\partial(\phi\rho_g S_g)}{\partial t} \qquad (11)$$

液相:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho_{w}V_{w})}{\partial r} + \overline{m}_{w} = \frac{\partial(\phi\rho_{w}S_{w})}{\partial t}$$
(12)

由于天然气水合物不能移动,在注热分解过程 中只是消耗了固态水合物,故有水合物相:

$$-\overline{m}_{H} = \frac{\partial(\phi\rho_{H}S_{H})}{\partial t}$$
(13)

其中

 $\overline{m}_{g}, \overline{m}_{w}$ —单位体积水合物分解生成的天然气和 水的质量, g/cm³ · s;

 \bar{m}_{H} —注热时单位体积天然气水合物分解的质量 .g/cm³ ·s:

 $\rho_{g}, \rho_{w}, \rho_{H}$ —天然气、水及天然气水合物的密度, g/cm³;

 V_x 、 V_w —天然气和水的渗流速度, cm/s;

 S_{g} 、 S_{w} 、 S_{H} —天然气、水及天然气水合物的饱和度;

 ϕ —水合物储层孔隙度, % 。

3.2.2 达西定律

$$V_i = \frac{K_{ri} \cdot K}{\mu_i} \frac{dP_i}{dr}$$
(14)

其中

 V_i —气液的渗流速度, cm/s;

$$K_{ii}$$
—各相相对渗透率(无固相);D(达西)

K—为储层渗透率;D(达西)

 μ_i —水气粘度, MPa・s;

P_i—相压力,10⁻¹ MPa;

3.2.3 分解动力学方程

目前,对天然气水合物分解速率的计算是按已 知参数来处理的,根据天然气水合物分解的化学过 程(1)式及分解动力学特征,采用 Kim-Bishnoi 提出 的分解动力学方程(Kim H 等,1987)

$$\overline{m}_{e} = k_{d}A_{s}(P_{e} - P) \tag{15}$$

其中

$$A_s = \sqrt{\phi_{w,g}^3 / 2k_d} \tag{16}$$

其中

 A_s —反应比表面积 , cm⁻¹;

 k_d 一反应速率常数 ,10⁻⁵/(m² · Pa · s);

 $\phi_{w.g}$ —天然气水合物多孔介质中气、水两相所 占的体积,%;

 P_f —水合物在临界分解温度 T_f 条件下对应的临界反应压力, 10^{-1} MPa。

3.2.4 辅助方程

由化学式(1)可知,1 mol 的天然气水合物分解 可生成1 mol 的甲烷气体和 n_{μ} 物质当量的水,因此 有:

$$\overline{m}_H = \overline{m}_g + \overline{m}_w \tag{17}$$

$$\overline{m}_{H} = -\overline{m}_{g} \frac{n_{H}M_{w} + M_{g}}{M_{H}}$$
(18)

$$\overline{m}_w = \overline{m}_g \, \frac{n_H M_w}{M} \tag{19}$$

$$S_g + S_w + S_H = 1$$
 (20)

式中 M_H 、 M_g 、 M_w 为水合物、气、水的摩尔质量, g/mol;

方程(11)~(20)是加热开采过程含有分解化 学反应的气、液两相渗流的基本方程组。给出了初 始条件和边界条件,即可通过数值法求解该方程组, 对加热开采水合物气层过程进行研究。

加热分解热传导过程数学模型,除了可以用数

值方法求解,还可以求解析解。Goodman 首先对具 有移动边界的热传导过程进行求解,采用相似方法 同样可得到水合物层中分解区中温度的表达式。

4 结论

(1)通过对加热开采水合物机理的研究,得出 了水合物的加热开采,是有移动边界的加热分解传 热和有移动边界和分解化学反应的气、液两相流流 动的相互独立而又相互联系的物理过程。

(2)水合物在加热分解过程中存在一个水合物 分解前缘,从而将水合物气藏分为水合物区和分解 区,分解前缘即为两个区的分界面,也是移动边界。

(3)分区研究了水合物加热分解热传导过程, 建立了数学模型,确定了边界条件,为求解水合物 区、分解区温度场随时间变化的解析关系提供了理 论依据。

(4)在符合实际的基本假设下,考虑了含有化 学分解反应,在分解区建立了气、液两相渗流流动的 数学模型。为进行加热开采水合物气层过程深入研 究奠定了基础。

[References]

- Bai Yu-hu, Li Qing-ping, Li Xiang-fang, Du Yan. 2009. Numerical simulation on gas production from a hydrate reservoir underlain by a free gas zone[J]. Chinese Science Bulletin, 54(5):865-872
- Burshears M O, Brien T J. 1986. Malone R D A multi-phase, multi-dimensional, variable composition simulation of gas production from a conventional gas reservoir in contact with hydrates [R]. Lowsville The Uncon Ventional Technology Sym posium, SPE:25-28
- Collett T S. 2002. Energy resources potential of Natural gas hydrates [J] . AAPE ,6(11) :1911–1922
- Das D K. 1993. Srivastava V Calculation of gas hydrate dissociation with finite -element model [J]. Journal of Energy Engineering, (3):180–200
- Goel N, Wiggins M. 2001. Shah S Analytical modeling of gas recovery from in situ hydrates dissociation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering ,29(2):115–127
- Holder G D A. 1982. thermo dynamic evaluation of thermal recovery of gas from hydrates in the earth [J]. Journal of Petroleum Technology, 37 [1]:147–149
- Hong H. 2003. Darvish M P A numerical study on gas production from formation containing gas hydrates [M]. Calgary Society of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy&Petroleum:130-145
- Jamaluddin A K. 1989. Kalogerakis N. Bishnoi P R Modelling of decomposition of synthetic core methane gas hydrate by coupling intrinsic kinetics with heat transfer rates [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 67:948-954
- Kamath V A. 1987. Godbole S P Evaluation of hot-brine stimulation technique for gas production from natural gas hydrates [J]. Journal of Petroleum Technology, 39:1379–1388

- Kim H, C Bishnoi P, R Heiderman R. 1987. A etal Kinetics of methane hydrate decomposition [J]. Chemical Engineering Science, 42 (7): 1645–1653
- Liu Y, Strumendo M. 2008. Arastoopour H Numerical simulation of methane production from a methane hydrate formation [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research ,47(8):2817–2818
- Liu Y, Strumendo M. 2009. Arastoopour H Simulation of methane production from hydrates by depressurization and thermal stimulation [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 48(5):2451-2454
- Masuda Y, Kurihara M. 2002. Ohuchi H A field simulation study on gas productivity of formations containing gas hydrates [M]. Yokohama University Yokohama:72–80
- McGuire P L. 1982. Recovery of Gas from Hydrate Deposits Using Conventional Technology: Unconventional Gas Recovery Symposium [M]. Pittsburgh, SPE:1-50
- Millkoy A. 2000. V Sassonr Novikova I etal Gas hydrate at minimum stability water depths in the Gulf of Mexico significance geohazard assessment Gulf[J]. Coast Assoc. Geo. Soc:217–224
- Moridis G J. 2003. Collett T S Strategies for gas production from hydrate accumulations under various geological and reservoir conditions[R]. Berkeley Lawrence Berkeley National Laboratory:83-84
- Nazridoust K. 2007. Ahmadi G Computational modeling of methane hydrate dissociation in a sandstone core [J]. Chemical Engineering Science, 62:6155-6177
- Selim M S. 1990. Sloan E D Hydrate dissociation in sediment [J]. SPE Reservoir Engineering, (6):241-251
- Song Yong-chen, Liang Hai-feng. 2009. 2–D Numerical Simulation of Natural Gas Hydrate Decomposition Through Depressurization by Fully Implicit Method[J]. China Ocean Engineering, 23(3):529–542
- Sun X F. 2006. Mohanty K K Kinetic simulation of methane hydrate formation and dissociation in porous media [J]. Chemical Engineering Science, 61:3476-3495
- Sun X, Nanchary N. 2005. Mohanty K K 1–D modeling of hydrate depressurization in porous media [J]. Transport in Porous Media,58(3): 315–338
- Sung W, Huh D. 2000. Ryu B Development and application of gas hydrate reservoir simulator based on depressurizing mechanism [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 17(3):344–350
- Swinkels W J A M. 1999. Drenth R J Thermal reservoir simulation model of production from naturally occurring gas hydrate accumulations

[R]. Texas, SPE:23-25

- Tang Liang-guang, Li Gang, He Shi-hui. 2007. Thermodynamic evaluation of natural gas hydrate production by thermal stituation[J]. Journal of engineerning thermophysics, 28 (1):5-8 (in Chinese with English abstract)
- Tsimpanogiannis I N. 2007. Lichtner P C Parametric study of methane hydrate dissociation in oceanic sediments driven by thermal stimulation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 56(1/3):165–175
- Xu Hong, Huang Jun-quan, Zeng Bin. 2005. Current research situation and resource potential evaluation gas hydrate in the world[J]. Natural gas industry,6:18-23(in Chinese with English abstract)
- Yu Xi-chong, Wu Ying-xiang, An Wei-jie, Wu Ya-ling. 2004. Mathematical model to recover gas hydrate from formations[J]. Natural gas industry, 24(1):63-67(in Chinese with English abstract)
- Zhang Liu, Yang Xiao-sen, Yang Gang. 2010. Review: Mathematic modeling of natural gas hydrate exploitation[J]. Geoscience, 24(5):979– 985(in Chinese with English abstract)
- Zhao Shengcai. 2002. Present situation of gas hydrate research and its development measures in China-Summary of Xiangshan Science Conference of No 160[J]. Advances in earth science, 17(3):461-464 (in Chinese)
- Zhu You-hai. 2006. Production test from gas hydrate of Mackenzze permafrost Canada[J]. Advances in earth science, 21(5):513-520 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

- 唐良广,李 刚,何世辉.2005.热力法开采地层中天然气水合物的热动力评价[R].北京:中国工程热物理学会第十一届学术会议: 16-25
- 许 虹,黄君权,曾 斌.2005.最新国际天然气水合物研究现状和资源潜力评估[J].天然气工业,6:18-23
- 喻西崇,吴应湘,安维杰,李清平,邬亚玲.2004. 开采地层中的天然气 水合物的数学模型[J].天然气工业,24(1):63-67
- 张 柳,杨小森,杨 刚.2010. 天然气水合物分解和开采的机理及数 学模型研究综述[J]. 现代地质,24(5):979-985
- 赵生才.2002. 天然气水合物研究现状及我国对策-香山科学会议第 160 学术讨论会观点摘要[J].地球科学进展,17(3):461-464
- 祝有海.2006. 冻土区天然气水合物试生产进展与展望[J]. 地球科 学进展,2(11):523-559

Mechanism of Heating Exploitation for Natural Gas Hydrates and Its Mathematical Models

WANG Ji-tang, ZHANG Xiao-mei

(Shanxi Vocational and Technical College of Coal, Taiyuan, Shanxi 030031)

Abstract: Based on current existing methods of hydrate exploitation, this paper further studies the mechanism of the hydrate heating exploitation method. It is considered that the hydrate is the result of heating decomposition, heating transfer and two-phase seepage flow of fluid and gas with chemical decomposition, which are not only mutually independent but also interconnected. Hydrate areas are divided into decomposition and non-decomposition areas. The front edge of the decomposition area is used as a mobile interface. Mathematical models of heating decomposition, heating transfer and two phase seepage flow of fluid and gas with chemical decomposition in decomposition area were established, which lays a foundation for further study of the hydrate heating exploitation process.

Key words: natural gas hydrate, heating exploitation, mathematical model, heating decomposition

190