

# 油页岩原位开采地下冷冻墙缓冲距离研究

李淑敏, 赵大军, 刘玉民, 隗延龙

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**油页岩原位高温开采,需要在矿区周边建立地下冷冻墙以阻止地下水的流入,防止油气的泄漏。油页岩的高温开采区与地下冷冻墙的冷冻区之间的缓冲距离影响油页岩的开采效果及地下冷冻墙的制冷效果,也影响整个工程的施工成本及运行费用。采用理论计算、数值模拟分析的方法,以最低成本为目标,对合理的缓冲距离进行了详细计算与分析,确定出了合理的缓冲距离,为油页岩高温开采地下冷冻墙的设计提供了理论指导。

**关键词:**油页岩;原位高温开采;地下冷冻墙;缓冲距离

**中图分类号:**TD83 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)12-0009-04

**Research on Buffer Distance of Underground Frozen Wall for Oil Shale Situ Mining/LI Shu-min, ZHAO Da-jun, LIU Yu-min, KUI Yan-long** (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** For oil shale situ high-temperature mining, underground frozen wall should be constructed to prevent underground water flowing into the mining area and the leakage of oil and gas. The buffer zone between the high-temperature mining area and the freezing zone of underground frozen wall not only affects oil shale mining and frozen wall cooling effects but also affects the entire project construction and operating costs. By theoretical calculation method and numerical simulation, with the lowest cost as the goal, the detailed calculation and analysis are made and the rational buffer distance is determined, which could be the theoretical guidance to underground frozen wall design for oil shale in situ high-temperature mining.

**Key words:** oil shale; in situ high-temperature mining; underground frozen wall; buffer distance

## 0 前言

地下原位开采是油页岩能源开发前沿技术之一,受到世界各国的关注。在油页岩原位高温开采过程中,为了隔绝周围地下水渗入开采区和防止开采区油气泄漏,需要在开采区周围建立安全可靠的地下冷冻墙。地下冷冻墙技术应用于油页岩原位高温开采时,为防止油页岩的高温开采区与地下冷冻墙的冷冻区之间的相互影响,两区之间需留有一定的距离,即缓冲距离。缓冲距离影响油页岩的开采效果及地下冷冻墙的制冷效果,也影响整个工程的施工成本及运行费用。

对缓冲距离的研究,可以为地下冷冻墙的设计提供理论指导。壳牌公司 ICP 技术中冷冻墙缓冲距离研究是此方面先驱,认为冷冻区与加热区之间的缓冲距离应为 125 ft 约 38 m<sup>[1]</sup>。国内冯雪威等<sup>[2]</sup>在“油页岩原位开采技术研究新进展”一文也表示缓冲距离应为 40 m 左右。但国内研究仅限于理论预测,目前并没有明确的计算方法和最佳值。本文采用理论计算、数值模拟分析的方法,以最低成本为

目标,对缓冲距离进行了详细计算与分析,确定出合理的缓冲距离。

## 1 基本理论及研究方法

缓冲距离受中间加热区高温和冷冻墙制冷低温的影响,如图 1。对油页岩高温加热部分和地下冷冻墙冷冻部分建立温度场的数学模型,为油页岩矿区地下冷冻墙缓冲距离的分析提供理论基础。结合有限元基本原理,利用数值模拟软件 ANSYS 对油页岩矿区的热量传递过程建模并进行数值模拟,得到矿区的温度场分布。再从保证建设成本和运营成本最低的角度,对地下冻土墙的设计进行优化,得到一个最合理的缓冲距离值。

### 1.1 数值分析的理论基础

研究油页岩原位开采的温度场问题,需要考虑岩体内部的热传导问题和对流换热问题。加热区对冷冻墙冷冻影响符合传热学基本原理,热传导的规律遵循傅里叶定律:

$$q = -\lambda(dT/dx)$$

收稿日期:2013-10-08

**基金项目:**教育部、财政部、吉林省人民政府联合资助的跃升计划项目“国家潜在油气资源(油页岩勘探开发利用)产学研用合作创新项目”中的子课题“油页岩地下冷冻墙技术研究”(OSR-06-02)

**作者简介:**李淑敏(1987-),女(汉族),吉林农安人,吉林大学硕士研究生在读,地质工程专业,从事岩土钻凿工艺及机具的研究工作,吉林省长春市西民主大街 938 号, lism11@mails.jlu.edu.cn。

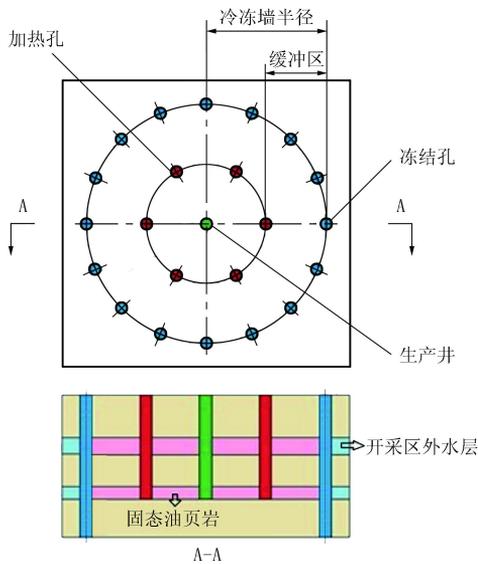


图1 地下原位开采生产井、加热孔与冻结孔布置简图

基于能量守恒定律,瞬态热平衡可以以矩阵形式表示为:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (1)$$

式中:  $[C]$ ——比热矩阵,考虑系统内能的增加;  $\{\dot{T}\}$ ——温度对时间的导数;  $[K]$ ——传导矩阵,包含热传导系数、对流系数、辐射率及形状系数;  $\{T\}$ ——节点温度向量;  $\{Q\}$ ——节点热流率向量,包含热生成。

冷冻区制冷遵循对流换热原理符合牛顿冷却定律是对流传热的基本定律:

$$Q = hA(t_1 - t_2) \quad (2)$$

式中:  $Q$ ——面积  $A$  上的传热热量;  $h$ ——对流传热系数,包括了所有影响对流传热速率的因素;  $A$ ——壁面面积;  $t_1$ 、 $t_2$ ——分别为固体表面和流体的温度。

## 1.2 模型建立

在建立油页岩原位加热的二维瞬态模型时,作如下假设:

(1) 将油页岩和土体都看作均匀且各项同性的传热介质;

(2) 土体的热传导系数、比热、密度等性质参数保持恒定,油页岩的热传导系数随温度的升高而改变,其他性质参数保持不变;

(3) 假设在计算区域,油页岩的初始温度和周围土体一致;

(4) 假设油页岩和周围土体之间没有接触热阻;

(5) 认为冻土墙已经冻结完成,形成一道连续止水墙,且温度维持在  $-1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

经过以上一系列假设简化了边界条件后,就可以建立一个油页岩原位高温 ICP 的二维瞬态传热模型。整个模型的计算区域在直角坐标系下的温度场控制方程如下:

$$v\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) \quad (3)$$

式中:  $v$ ——油页岩的比热,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{ }^\circ\text{C})$ ;  $\rho$ ——油页岩的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T$ ——模型中瞬态温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $t$ ——热传递进行的时间,  $\text{s}$ ;  $\lambda$ ——油页岩的热传导系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{ }^\circ\text{C})$ 。

根据实际开采情况的参数,确定物理模型的参数为:模型中心的油页岩区域半径为  $50\text{ m}$ ,油页岩区域中心的加热井以网格状均匀分布在油页岩开采区域内,相邻加热井之间的间隔约为  $10\text{ m}$ ,加热孔的直径为  $0.5\text{ m}$ <sup>[3]</sup>。

## 2 数值分析

ANSYS 软件有很好的热分析模块,我们利用其对油页岩开采区冻结孔与加热孔建模,得到高温加热区与冷冻墙温度场变化云图,来帮助我们更直观的了解不同缓冲距离变化与差别<sup>[4]</sup>。

### 2.1 油页岩原位加热模型的初始条件和边界条件确定

(1) 假设油页岩区域初始温度与土体一致,确定初始温度为  $10\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(2) 由 Bose 热传导远边界理论<sup>[5]</sup>  $R_x \geq 4\sqrt{a_x t}$ , 假设模型区域的远边界半径处温度保持恒定,即为冻土墙维持的温度  $-1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(3) 加热井内加热器的功率选用  $2\text{ kW}$  可达到油页岩加热温度的要求。折合成壁面热流量  $2064\text{ W}/\text{m}^2$ 。

(4) 油页岩热传导系数以及油页岩和土体的其他性质参数<sup>[6,7]</sup>,见表1,表2。

表1 油页岩热传导系数

温度/ $^\circ\text{C}$	热传导系/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	比热/ $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{ }^\circ\text{C})^{-1}]$
10	0.74	2110
130	0.84	1850
250	0.50	950
350	0.43	1100
450	0.43	580
520	0.30	550
600	0.26	390

### 2.2 模型建立与网格划分

根据以上参数建立模型,为了得到油页岩原位

表 2 油页岩和土体的其他性质参数

参数	热传导系数 /[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	比热/[J· (kg·°C) <sup>-1</sup> ]	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )
油页岩	/	/	1740
土体	1.13	1200	1650

开采过程中冻土墙的最佳缓冲距离,我们选择了 3 个不同的缓冲距离值,即 30、40、50 m 进行数值模拟,冻土墙半径即为 80、90、100 m,比较他们的温度场分布情况。以缓冲距离 40 m 的情况为例,建立模型如图 2,网格划分如图 3 所示。

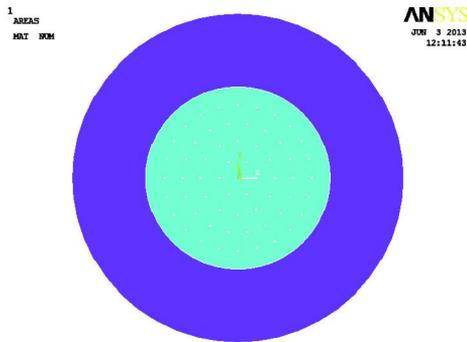


图 2 ANSYS 物理模型图

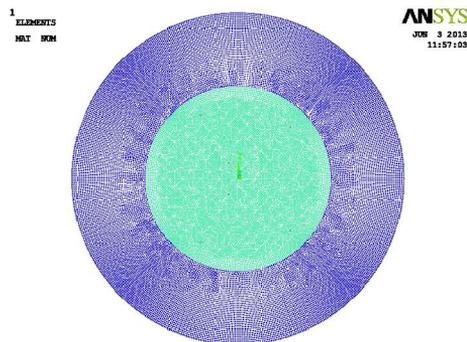


图 3 ANSYS 模型网格划分图

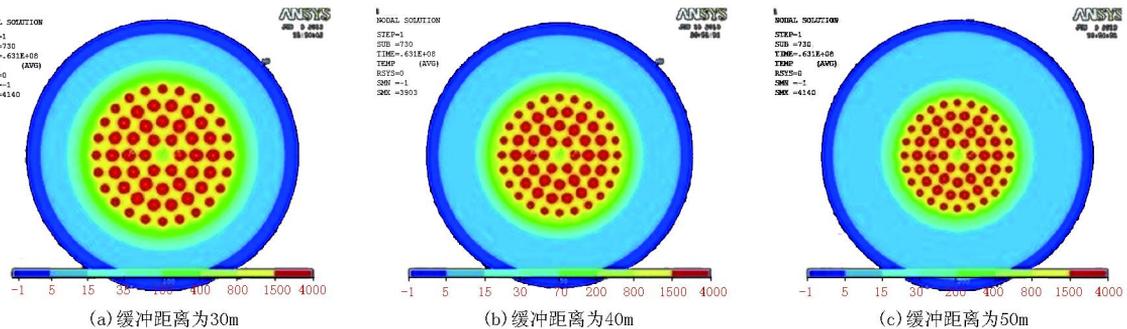


图 4 温度云图

需要说明的是,在模型中对加热井井壁附加加热荷载有 2 种方式。一种是在井壁上附加温度荷载,一种是附加热流密度荷载。当附加温度荷载时,靠近井壁附近的温度场更接近真实值,而距加热井较远的地方温度场比真实值略低。当对井壁附加热流密度荷载时,离加热井较远处的温度场更接近于真实值,而紧贴井壁周围的温度场会比实际情况高,而且最大温度值比实际情况高很多。由于本文着重考虑缓冲区处的温度场,因此选择附加热流密度荷载,而加热井周围的与实际情况不相符的高温并不影响本文的分析研究,可以忽略<sup>[8]</sup>。

### 2.3 结果分析

对缓冲距离为 30、40、50 m,外围冻土墙半径为 80、90、100 m 的模型的温度场进行数值模拟,得到的温度云图如图 4 所示。

从模拟出的温度场云图可以看出,随着缓冲距离不断增大,油页岩中心加热区域的温度场并没有明显的变化,而冻土墙周围的温度场则有很大区别。缓冲距离较小时,冻土墙附近的温度场温度梯度较大,温度也相对较高。而缓冲距离较大时,冻土墙附近的温度场温度梯度较小,温度也相对较低。

### 3 成本分析

通过 Fluent 软件,可以模拟冻结管换热器周围的温度分布,模拟结果显示冻结管换热器的影响半径约为 1~2 m,因此确定相邻冻结孔的距离为 2 m 较为合适<sup>[9]</sup>。通过对可变成本中的制冷功率及电费、设备费用、材料费、钻进施工费用、测试化验加工费等成本的综合分析。将不同缓冲距离方案的成本比较分析整理,如表 3 所示。

将不同缓冲距离下的成本预算绘制成曲线,见图 5。

从能源节约成本最低的角度进行优化后,从曲线中可以明显看出,当缓冲距离过大时,需要冷冻的

冻土墙体积增大,冻结孔数量增多,施工钻进费用过多,当缓冲距离过小时,冻土墙距离油页岩加热中心过近,油页岩高温区的热量传递至冻土墙区域,维持冻土墙的温度则需要更大功率的制冷机组,设备

表3 不同缓冲距离方案的成本比较分析表

缓冲距离/m	冻结孔个数/个	单位体积制冷量/(kJ·m <sup>-3</sup> )	制冷功率/kW	实际功率/kW	制冷机组功率/kW	电费/万元	设备费/万元	材料费/万元	钻进施工费/万元	测试化验加工费/万元	总计/万元
30	250	207105	651.6	781.9	303.1	483.7	390.2	889.4	375	5	2143.3
35	266	161709	541.0	649.2	251.6	401.6	337.3	947.4	399	5	2090.3
40	282	104964	372.1	446.5	173.1	276.2	256.3	1005.5	423	5	1966.0
45	298	97398	364.6	437.6	169.6	270.7	253.0	1063.5	447	5	2039.2
50	314	86049	339.3	407.1	157.8	251.9	241.1	1121.6	471	5	2090.6

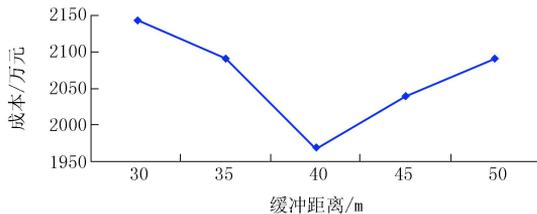


图5 不同缓冲距离的成本曲线图

随着以后软件系统和精度的不断完善和提高,需要进一步验证模拟结果与基础理论的相符性,为工程的设计施工提供理论指导。

#### 参考文献:

- [1] Shell Frontier Oil and Gas Inc. E - ICP Project plan of operation - oil Shale Research And Development Project [R]. Houston: Bureau of Land Management U. S. 2006.
- [2] 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.
- [3] 方朝合,郑德温,葛稚新. 壳牌 ICP 技术现场试验[J]. 科技创新导报,2010,(36):110-111.
- [4] 辛文彤,等. ANSYS 热力学有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [5] 吕朋,孙友宏,李强. 地热井 U 型管周围土壤温度场的 ANSYS 模拟[J]. 世界地质,2011,30(2):301-306
- [6] 胡向东,黄峰,白楠. 考虑土层冻结温度时人工冻结温度场模型[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(4):550-555.
- [7] 肖朝响,胡向东. 上海人工冻结土层热物理参数[J]. 福建工程学院学报,2009,7(6):638-641.
- [8] Andersland O B, Ladanyi B. Frozen Ground Engineering: 2nd Ed [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc,2004.
- [9] 于磊. 油页岩原位开采地下冷冻墙制冷系统的实验研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2012.
- [10] 杨林,赵大军,张金宝,等. 油页岩原位高温开采地下冷冻墙的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):247-252.
- [11] 杨阳,孙友宏,李强. 高压 - 工频电加热原位裂解油页岩的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):244-246.

成本和耗电费用会相应增大。由上述计算可知,40 m 的缓冲的距离相对较为合适。

#### 4 结论与展望

(1)使用 ANSYS 数值模拟软件对冻土墙的缓冲距离进行了仿真分析,得到了不同缓冲距离下的温度场数值模拟结果。

(2)在此模拟的基础上,从成本角度进行优化,最后可以计算出最节约能源最合理的缓冲距离为 40 m。

虽然已经做了很多研究工作,但是受限于软件模拟的精度,没有将研究做到完美,还存在一些不足之处。在对油页岩加热过程进行数值模拟时,有限元法只能近似无限逼近真实值,由于不使计算量过于庞大,网格划分没有过于细密,导致模拟的结果并不十分精确。在成本计算时,只计算了对结果有较大影响的成本值部分,而将一些数值较小的成本计算忽略不计。

## 广东阳江地热千米科钻竣工

《中国矿业报》消息(2013-12-17) 广东阳江新洲地热勘查千米科钻日前顺利终孔,该孔深 1002.25 m,基岩段岩收采取率达 100%,井内水温 110.2℃。

据了解,于 2013 年 8 月份正式实施的这一钻探工程,为中国地质调查局部署、中国地质大学(武汉)和广东省地质局共同承担的珠江三角洲及周边地区控热地质构造调查研究项目内容之一,钻探工作由广东省地质局第四地质大队承担。该项目拟通过实施地热深钻工程,全面、系统、多层次地开展地热科学研究。

广东是经济大省,能源消耗量大。然而,广东省地热资源丰富,具有广阔的开发应用前景,这对解决广东省能源短缺问题将起到积极的作用。因此,通过开展珠三角及周边地区深部控热地质构造调

查研究,建立深部地质结构框架,为寻找广东省深部地热资源靶区,开展干热岩资源勘查具有重要意义。

据了解,查明深部断裂构造、岩浆岩体(特别是隐伏岩浆岩)分布,系统、全面探讨构造特征以及研究浅层地热分布与深部控热构造的关系等重大科学问题,需要通过科学钻探来获取直接的原位测试资料及采样进行室内试验。阳江新洲地热千米科钻的施工内容包括:岩收编录及岩矿鉴定;岩石化学成分、热导率、生热率等测试,境内地温及地热流体压头、地热流体温度和井中一系列物性参数测试,地热流体降压试验,地热流体化学成分、同位素测试等。

目前,项目组正在开展一系列测井工作,以获取相关科研数据。