

制冷液温度对地下冷冻墙制冷效果影响的有限元分析

翟国兵, 赵大军, 张金宝, 刘玉民, 孙梓航, 刘华南

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要:油页岩原位开采、矿山竖井施工、基坑支护等工程中,常采用地下冷冻墙进行止水和护壁。在地下冷冻墙制冷系统中,制冷液温度影响冻结交圈时间,进而影响地下冷冻墙的制冷效率,更影响工程的施工成本及运行费用。通过有限元模拟,对制冷过程中地下温度场进行理论分析,得出制冷液温度对地下温度场的影响规律,并对制冷液温度进行优化,得到在制冷机组制冷或风冷制冷方式下,制冷液温度应在 $-10 \sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 较为合适的结论,为提高地下冷冻墙制冷效率提供理论指导。

关键词:地下冷冻墙;有限元模拟;制冷液温度;制冷效率

中图分类号:TD26;TU47 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)06-0053-06

Finite Element Analysis on the Influence of Cooling Liquid Temperature on the Refrigeration Effect of Underground Frozen Wall/ZHAI Guo-bing, ZHAO Da-jun, ZHANG Jin-bao, LIU Yu-min, SUN Zi-hang, LIU Hua-nan (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: For oil shale in-situ mining, mine shaft construction and foundation pit support, underground frozen wall should be built to prevent underground water flowing into the mining area and the leakage of oil and gas. Cooling liquid temperature of underground frozen wall not only affects freezing closure time, but also affects the refrigeration efficiency of the underground frozen wall and further affects the entire costs of the construction and operation. By the finite element simulation and the theoretical analysis on the underground temperature field in the refrigeration process, the influence law of cooling fluid temperature on the underground temperature field was found and the cooling liquid temperature was optimized. It was concluded that under refrigeration modes of refrigeration unit or air cooling, the appropriate temperature of cooling fluid should be -10 to $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, which could be the theoretical guidance to improve the refrigeration efficiency of underground frozen wall.

Key words: underground frozen wall; finite element simulation; cooling liquid temperature; refrigeration efficiency

0 引言

在油页岩原位高温开采过程中,需建立安全可靠的地下冷冻墙以隔绝周围的地下水渗入,防止油气泄漏^[1]。地下冷冻墙还可用于矿山竖井开挖、基坑临时支护等领域,目前在竖井开挖中应用最为广泛。冷冻墙形成冻结的过程为:冻结管周围的地层冻结,形成圆柱体,冻结柱体沿径向扩展,在相邻冻结体之间形成冻结交圈^[2]。最后,冻结交圈发展成为冷冻墙屏障。

地下冷冻墙的制冷液温度影响冻结交圈时间、制冷效率及成本。因此,本文基于有限元模拟,分析制冷液温度对地下温度场的影响规律,优化在不同制冷方式下的制冷液温度,有利于提高制冷效率、节

约能源、减少施工成本和运行费用,为地下工程建设尤其是油页岩原位开采提供技术支撑,具有非常重要的理论及现实意义。

在应用地下冷冻墙于油页岩原位开采方面,国内相关研究报道极少,国外的壳牌公司对此研究相对成熟^[3-4]。关于人工冻结,国内外学者主要集中在冻结井结构设计、冻结土物理力学性质及冻土帷幕温度等方面研究。李功洲对现场冻结壁温度场和位移进行实测研究,认为降低冷冻液的温度可提高冻结壁的扩展速度,提高强度,同时可抑制深井壁的位移过大^[5]。李述训等基于数学建模描述了岩土冻结过程中温度场变化规律,并结合实测资料研究了相邻冻结管之间温度场扩展变化及外侧冻结壁的

收稿日期:2015-02-06; 修回日期:2015-04-21

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”之“油页岩地下冷冻墙技术研究”(编号:OSR-06-02)

作者简介:翟国兵,女,汉族,1991年生,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,1057170653@qq.com。

形成变化规律^[6-7]。

但国内研究仅限于分析模拟冻结过程中整个冻结井温度场的变化和冻结交圈规律,从理论上预测冻结井温度场的影响因素,并未在明确控制其它变量的条件下研究制冷液温度对制冷效果的影响规律。本文基于有限元分析方法,对制冷液温度对地下冷冻墙制冷效果的影响规律进行了分析研究,并以提高效率、降低成本为目标,对制冷液温度进行优化。

1 基本理论及模型建立

1.1 假设条件与理论基础

为便于分析求解地下换热器复杂的换热过程,作出以下假设:

(1)假设在传热过程中,土体物理成分、热物性参数保持不变;

(2)假设换热器内同一截面流体速度、温度分布均匀;

(3)假设热量传递在土体中沿径向和垂直方向,忽略圆周方向的导热过程;

(4)假设回填土与孔壁、换热器与回填土接触完好,忽略接触热阻;

(5)假设土体与换热器之间热量传递为纯导热的传热过程,忽略水分迁移的影响;

(6)在所建求解区域物理模型中,假设求解区域半径为远边界半径,由远边界理论可知 $R \geq 4\sqrt{a_s t}$,为确保计算精度,避免受热流扩散影响,应将远边界半径选取的足够大^[8],此处选取为 10 m。

根据以上假设条件,建立地面以下径向二维瞬态的传热模型如图 1,管外侧土体热传导是径向一维不稳定传热方式,其在平面直角坐标系内满足下列热传导微分方程:

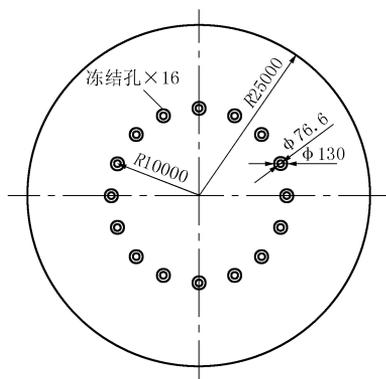


图 1 求解区物理模型

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial \theta}{\partial r}) = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, b < r < \infty, \tau > 0 \quad (1)$$

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial r} = \alpha (\theta_f - \theta), r = b, \tau > 0 \quad (2)$$

$$\theta = 0, r \geq b, \tau = 0 \quad (3)$$

式中, r ——土体半径,m; a ——土体导温系数, m^2/s ; k ——土体导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; θ ——过余温度($\theta = t - t_0$), $^\circ C$; t_0 ——初始温度, $^\circ C$; θ_f ——管内载冷剂的过余温度($\theta_f = t_f - t_0$), $^\circ C$; t_f ——载冷剂在换热器内平均温度, $^\circ C$; α ——载冷剂与孔壁间对流换热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; τ ——时间,s。

1.2 传热初始条件与边界条件

初始温度值为在实验系统未运行时,在换热器中注入制冷液后,待地下温度稳定时所测温度值^[9-10]。由实验现场数据得,地下 4 m 以深初始温度平均值为 8.25 $^\circ C$,所以取该值为模拟的初始温度值^[11]:

$$t_0 |_{\tau=0} = 8.35 \text{ } ^\circ C$$

热流密度 Q 在地下换热器内壁均匀加载,忽略循环介质影响,低温循环液的平均温度即为冻结管内壁平均温度,即:

$$Q = -k_s \left. \frac{\partial \tau}{\partial n} \right|_{\Gamma}$$

式中: Q ——热流密度, $J/(m^2 \cdot s)$; k_s ——换热器导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; n ——经过该点等温线上的法向单位矢量; Γ ——地下埋管换热器的内壁。

2 仿真模拟与分析

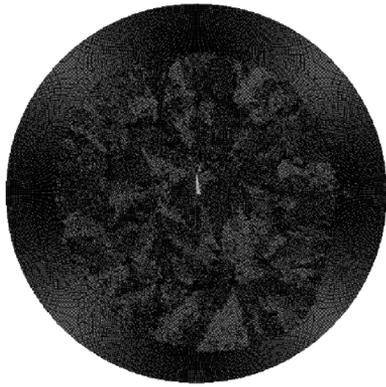
2.1 模型建立与网格划分

本文采用 ANSYS 分析软件模拟不同制冷工况下的地下土体温度场变化情况,采用 ANSYS PLANE55 单元,单元中每个节点只有一个自由度,即为温度。采用自动划分网格,冻结管及整个求解区域的网格划分情况如图 2 所示。对于 16 个同轴管换热器区域,由于温度变化明显,温度梯度较大,因此此区域网格划分细密,网格最大边长 5 mm,网格精度为 5;对于其它区域,划分网格时采用按比例增大,控制网格最大边长 50 mm。

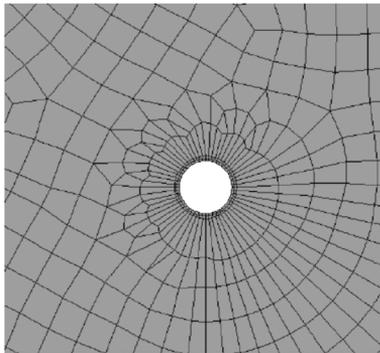
2.2 模拟参数设计

在仿真分析温度对冻结效果的影响时模拟相关参数如表 1 所示。

获取数据时,选取 5 个温度采集孔。如图 3 所示,



(a) 求解区域



(b) 冻结管区域

图 2 地层冻结区域网格划分

表 1 有限元分析模拟参数

项 目	导热系数/[W·(m·℃) ⁻¹]	比热/[J·(kg·℃) ⁻¹]	密度/(kg·m ⁻³)
HDPE 冻结管	0.52	2292	965
粘土层	1.21	1516	1919
CaCl ₂ 冷冻液	0.521	2847	1240
回填材料	1.115	1360	2000
未冻土体	1.269	1516	
冻土	1.28	1231	
未冻当量材料	0.9	1400	
冻结后当量材料	1.2	1200	
冻结时间	180 d/4320 h/15.6 × 10 ⁶ s		
地层初始温度/℃	8.25		
冻结温度/℃	-2		
模拟冻结半径/m	10		
地下换热器外管内径/m	0.0766		

沿冻结管排布圆周,距冻结管内侧 1、2 m 处分别为 2 号、1 号采集点,距冻结管外侧 1、2 m 处分别为 3 号、4 号采集点,冻结孔中间为 5 号采集点。

2.3 制冷液温度对冻结效果的影响分析

分别在制冷液温度为 -5、-10、-15、-20 ℃ 时,模拟地下制冷系统运行 180 d 后的土体冻结情况,并得到 1~5 号数据采集点的温度云图和温度变化曲线,如图 4~7 所示。

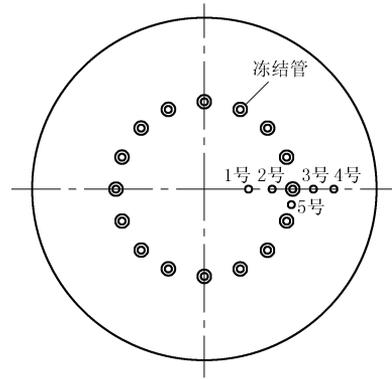


图 3 测温孔分布示意图

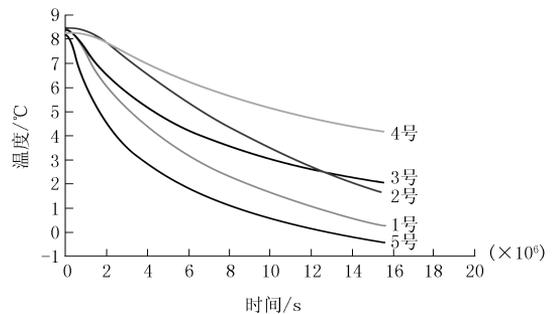
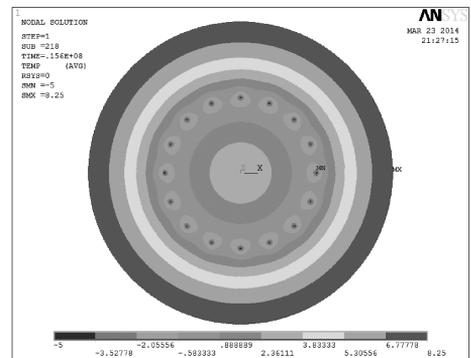


图 4 温度为 -5 ℃ 的温度云图和各个测温点的温度变化曲线

由图 4~7 可知,在冻结时间 15.6×10^6 s (4320 h) 后:制冷液温度为 -5 ℃ 时,1 号、2 号测温孔温度下降速度分别快于 3 号、4 号,但均未达到 0 ℃,冻结圈沿内扩展约 0.5 m,外侧约 0.3 m,均未扩展到 1 m,位于冻结管中间的 5 号测温孔温度降低速度最快,最终下降到 -0.4 ℃,最先进入冻结阶段,但并未达到完全冻结温度,仍需一段时间的冻结才能完全交圈。制冷液为 -10 ℃ 时,除 4 号外其他各孔均进入冻结阶段,冻结管内侧冻结圈已扩展至 1.6 m,外侧不足 1 m,约为 0.7 m。同时,5 号测温孔曲线末温度达到 -3.67 ℃,说明相邻冻结管中间地层已形成有效冻结交圈,即已经完全冻结。制冷液为 -15 ℃ 时,内侧扩展宽度约 3 m,外侧约 1.2 m。冻结圈

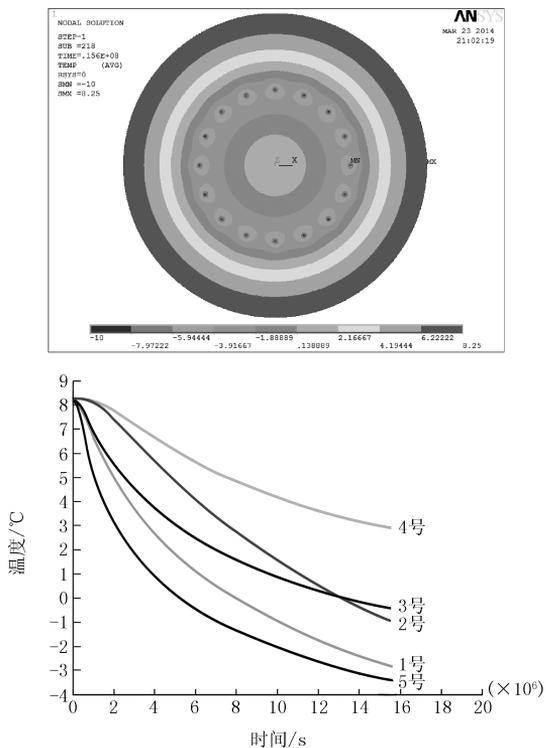


图5 温度为 -10 °C 的温度云图和各个测温点的温度变化曲线

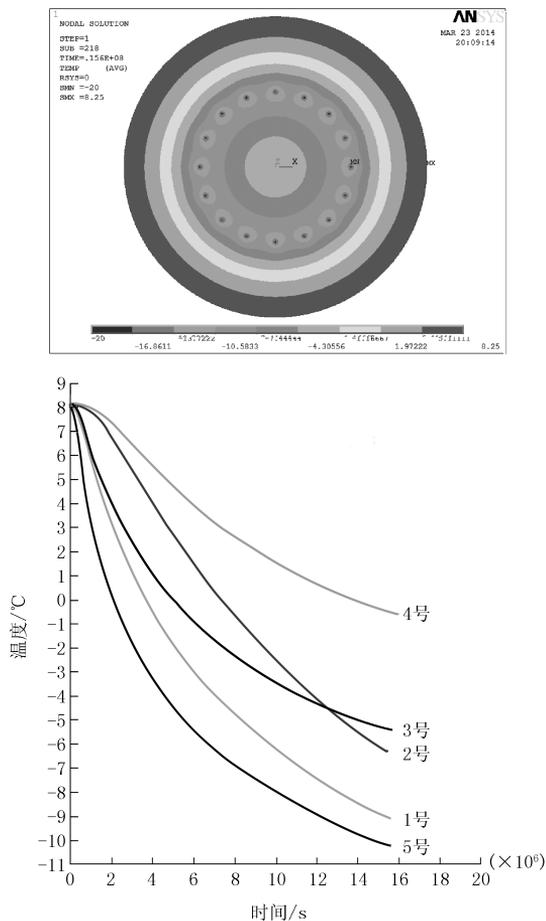


图7 温度为 -20 °C 的温度云图和各个测温点的温度变化曲线

均扩展 1 m 以上,内侧宽度大于外侧。5 号测温点在冻结 4.7×10^6 s (1319 h) 后,温度下降至 -2 °C,完成交圈,并继续冻结,进一步扩展交圈宽度。制冷液为 -20 °C 时,内侧冻结圈扩展至 5 m,外侧扩展至 1.8 m。5 号测温点在冻结 3.2×10^6 s (880 h) 时,温度已低于 -2 °C,完成交圈。

在制冷液温度为 $-5 \sim -20$ °C 条件下,模拟得到各测温孔冻结 15.6×10^6 s (4320 h) 后的温度值和温度变化幅度,统计如图 8、图 9 所示。

由图 8、图 9 可知,温度曲线基本呈直线下降,1 ~ 5 号测温孔末温度值随制冷液温度降低而降低,而 1 ~ 5 号测温孔的降温幅度随着制冷液温度降低基本呈增大趋势,由此说明在 $-5 \sim -20$ °C,随制冷液温度降低,地层制冷温度逐渐降低,制冷效率提高。

完全冻结温度为 -2 °C,当制冷液温度为 -5 °C 时,1 ~ 5 号测温孔均未达到完全冻结。制冷液 -10 °C 时,只有 5 号和 1 号达到完全冻结阶段。

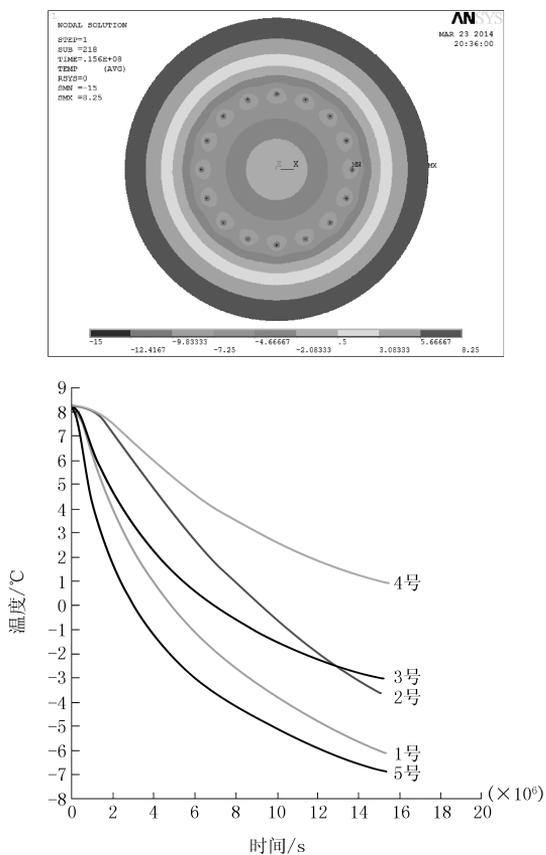


图6 温度为 -15 °C 的温度云图和各个测温点的温度变化曲线

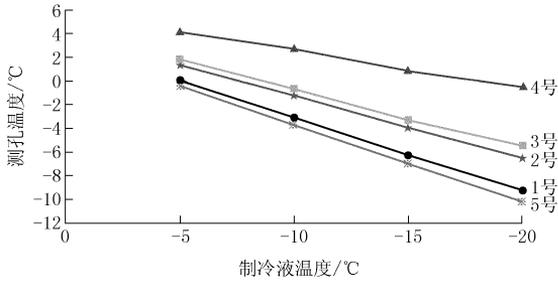


图8 不同制冷液温度下各个测点温度值曲线

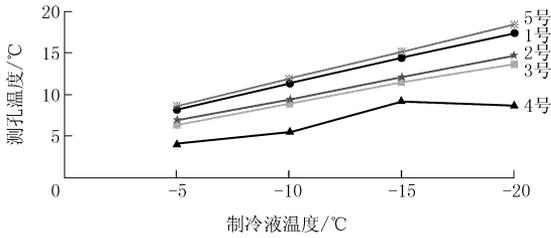


图9 不同制冷液温度下各个测点温度降低值曲线

制冷液 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,除4号测温孔仍在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,其他各孔均达到完全冻结。制冷液 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,除4号以外各测温孔仍均处于完全冻结状态,且各自温度均低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时所测,4号温度虽降低至 $-0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$,但未完全冻结。从 $-5\sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$,达到完全冻结状态的测温孔逐渐增多,说明完全冻结区域面积 ($-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下)随制冷液温度降低而扩大。而5号、1号、2号、3号依次达到完全冻结状态,说明冻结圈在冻结管内侧扩展速度快于外侧,并且由于地层冻结交圈作用,位于两相邻冻结管中间地层冻结速度最快,冻结效率最高。

在同一制冷液温度下,5号温度值均为最低,1号、2号测温曲线温度值低于3号、4号温度值,且1号温度均低于2号,3号均低于4号;5号温度降幅最大,1号、2号降幅大于3号、4号,1号降幅大于2号,3号大于4号。说明沿冻结管所排布的圆周,其内侧的制冷效果和速率强于外侧,并随距冻结管中心距离增大而减弱。制冷受冻结交圈作用影响,相邻冻结管之间地层制冷效果最好,效率最高。

同时可以看出,制冷液温度由 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,虽然各个测温孔温度均降低,但达到完全冻结状态的测温孔个数并未增多。而图9中4号测温孔温度降低幅度在 $-5\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增长缓慢,在 $-10\sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增长迅速,在 $-15\sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度降低幅度有轻微下降,说明地层制冷效果随制冷液温度的降低而增强,但过低的制冷液温度对冻结管外围的

地层的制冷效果影响不大。

3 冷冻液温度的优化

为优化地下冷冻墙的制冷液温度,将制冷液温度分别设定为 -5 、 -7.5 、 -10 、 -15 、 -20 、 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行模拟冻结,得到不同制冷液温度下的冻结交圈时间。制定以制冷液温度为横坐标,交圈时间为纵坐标的坐标系,将以上点绘制在坐标系中,并将其拟合成一条曲线,如图10所示。

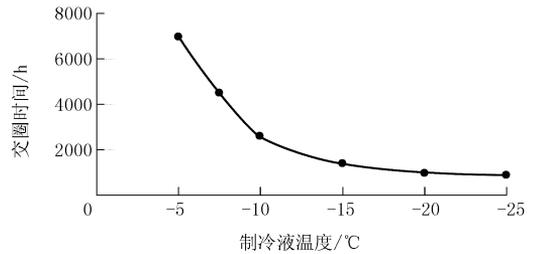


图10 冷冻液温度与交圈时间趋势

由图10可知,总体上,从 $-5\sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$,交圈时间随制冷液温度的降低而减少,但在不同的温度段降低的趋势有所不同。

温度由 $-5\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$,曲线基本呈直线状下降趋势,交圈时间随温度降低而迅速减少;温度由 $-10\sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$,曲线呈凹形,交圈时间随温度降低而减少的趋势放缓;温度由 $-15\sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$,曲线更加平缓呈近似水平直线状态,交圈时间随温度的降低变化很小,基本趋于稳定。

分析产生以上趋势的原因为:在制冷液温度较高的条件下,地层与制冷液温度梯度较小,使得地层温度降低速度较慢。随着制冷系统的运行,地层温度逐渐下降,当其降低至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下而开始冻结时,温度梯度更小,温度下降速率更慢,冻结时间延长,因此交圈时间较长。而在制冷液温度过低的条件下,地层与制冷液温度梯度虽较大,但由于冻结过程受地层热传导系数限制,温度下降速率达到最大值并保持稳定,因此冻结交圈时间值虽小却不能无限缩短,最终趋于稳定值。

通过对可变成本中的制冷功率及电费、设备折旧费、材料费、钻进费、检查费等费用的综合分析,将不同制冷液温度方案的成本整理并绘制曲线如表2及图11所示。可以看出,成本随制冷液温度的降低而增大,在 $-5\sim -7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,曲线较平缓,成本随制冷液温度降低变化幅度不大;在 $-7.5\sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$,曲线

变化率有所增大,成本随制冷液温度降低呈线性增长;由 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,曲线变化幅度陡然变大,成本随温度的降低而增长的幅度最大;由 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,曲线最为平缓,随温度的降低,成本变化很小。

表2 不同制冷液温度的成本分析

温度/ $^{\circ}\text{C}$	制冷机 组功 率/kW	电 费/ 万元	设备折 旧费/ 万元	材料 费/ 万元	钻进 费/ 万元	化验检 测费/ 万元	总计/ 万元
-25	73.87	67.3	12.3	29.4543	5.05	4.675	118.7793
-20	69.78	63.6	11.9	28.6543	5.05	4.675	113.8793
-15	46.51	42.3	5.5	26.8543	5.05	4.675	84.3793
-10	26.16	23.8	5.5	26.8343	5.05	4.675	65.8593
-7.5	12.82	11.7	4.3	26.5143	5.05	4.675	52.2393
-5	9	8.2	4.3	26.0543	5.05	4.675	48.2793

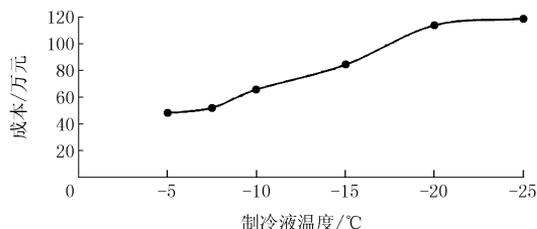


图11 不同制冷液温度的成本曲线

因此从交圈时间曲线可知,当制冷液温度高于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随制冷液温度降低,交圈时间有较大的降低空间,冻结速率提高较快,而当制冷温度低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随制冷温度降低,交圈时间基本趋于稳定,变化幅度极小,冻结速率提高空间极小。同时由成本曲线可看出,若采用制冷机组制冷,制冷液温度越低,所需制冷机组功率越大,当制冷液温度低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,设备的投资与运行成本会大幅增加;若采用风冷机组制冷,制冷液温度受制于环境温度影响,利用东北地区冬季自然冷源,环境温度平均温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,制冷液平均温度可达 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此综合考虑各种因素条件,虽然由前文可知随制冷液温度下降,地层制冷温度降低,但过低的制冷液温度对冻结交圈速度的提高影响不大,并且一味追求更低的制冷温度还会受到成本和环境等因素的制约,因此,采用制冷机组制冷或风冷制冷方式,选取制冷液温度在

$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 较为合适。

4 结论

(1)以地下冷冻墙实验平台为模拟对象,使用ANSYS数值模拟软件,进行了制冷液温度对冻结效果影响的相关模拟分析,得到了不同制冷液温度下的温度场。

(2)在综合考虑地下冷冻墙交圈时间、制冷效率、工程成本等因素,对制冷液温度进行优化,得出在制冷机组或风冷制冷方式下,制冷液温度应在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 较为合适。

虽已进行了很多研究工作,但受限于软件模拟精度、网格划分细密程度等因素,仍存在不足之处。在之后的研究工作中,为提高结论精确性,进行不同制冷液温度的模拟时,要减小模拟温度间距,并着重进行制冷温度在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间的冻结模拟,进一步提高优化值的精度。

参考文献:

- [1] 李淑敏,赵大军,刘玉民,等.油页岩原位开采地下冷冻墙缓冲距离研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(12):9-12.
- [2] 张金宝.油页岩原位开采地下冷冻墙联合制冷系统的实验研究[D].吉林长春:吉林大学,2014.
- [3] 段会军.地下冷冻墙换热器的研究[D].吉林长春:吉林大学,2012.
- [4] 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.
- [5] 李功洲.深井冻结壁位移实测研究[J].煤炭学报,1995,20(1):99-104.
- [6] 李述训.立井冻结法凿井工程中的热工计算[J].冰川冻土,1994,16(1):21-30.
- [7] 南卓铜,李述训,程国栋,等.地面冻结数模型及其在青藏高原的应用[J].冰川冻土,2012,(1):89-95.
- [8] 赵研.太阳能地下混凝土存取热试验研究与数值模拟[D].吉林长春:吉林大学,2011.
- [9] 张金宝,赵大军,于磊,等.严寒地区自然冷源用于冷冻墙制冷系统[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,(S3):329-336.
- [10] 李淑敏.基于自然冷源的地下冷冻墙制冷系统研究[D].吉林长春:吉林大学,2014.
- [11] 王健.油页岩原位开采温度场的数值模拟[D].吉林长春:吉林大学,2011.