

多圈管冻结模型试验水热力分析研究¹⁾

吕晶晶²⁾ 李栋伟

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽淮南 232001)

摘要 人工多圈管冻结过程中的温度场、应力场及水分场的相互作用, 是一个非线性多场耦合问题, 影响因素多. 本文以淮南顾北矿作为模型设计原型, 通过模型试验对多圈管冻结土体过程的温度场、应力场及水分场变化进行研究, 获得了冻结温度场、冻结压力及含水量随冻结时间的变化规律, 其成果对建立水热力耦合数学模型提供可靠依据并能更好的指导矿井工程实践.

关键词 模型试验, 多圈管冻结, 温度场, 应力场, 水分场

中图分类号: TD265 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0879-13-034

THE ANALYSIS OF MULTI-COIL PIPE FREEZING MODEL EXPERIMENT¹⁾

LÜ Jingjing²⁾ LI Dongwei

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science & Technology, Anhui, Huainan 232001, China)

Abstract The interaction between the temperature field the pressure field and the moisture field in the multi-coil pipe freezing process is a problem of non-linearity and multi-fields, involving many factors. The temperature field, the pressure field and the moisture field in the freezing process are studied by the model experiment based on the Gubei Mine in Huainan, the variations of the temperature filed, the pressure field and the moisture field against the freezing time are obtained. The results can be used to establish the coupling model of the moister fields, the temperature fields and the pressure fields to be used in mining engineering practice.

Key words model experiment, multi-coil pipes freezing, freezing temperature field, pressure field, moisture field

引 言

在冻结壁的形成过程中, 土体温度降低使土中的水分迁移^[1] 并结冰冻结, 这样土体内部产生冻胀力^[2] 使土中应力重新分布, 这是一个复杂的相互作用的综合过程. 因此, 在研究冻土的形成时必须考虑土体的水分场、温度场及应力场的复杂相互作用变化^[3].

关于冻结过程中的水热力耦合的研究, 早在 1973 年 Harlan^[4] 便第一次将水分迁移和温度场耦合起来进行分析, 并给出了热质迁移的数学模型; Shen 和 Ladanyi^[5] 在 Harlan 流体动力学模型的基础上, 把迁移的水分量简单等效成一附加变形而作用在应力场上, 从而建立起准三场模型; 程知言^[6]

对饱和软土地区的浅表隧道多冷源冻结的温度场、应力场、水分场耦合原理、规律及相关参数进行了较系统的研究, 并通过简化和假定得到了浅表隧道多冷源冻结情况的温度场、应力场、水分场耦合数值解; 赖远明等^[7] 进行寒区挡土墙温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析, 并将研究土体分为已冻区和未冻区; 李宁等^[8] 研究了冻土路基温度场、水分场、变形场耦合的数值方法, 对天然冻土三场耦合研究奠定了基础; 王铁行等^[9] 指出通过水热力耦合作用机理性研究确定水热力耦合参数及变量, 是目前进行水热力耦合研究的中心问题.

本文以淮南矿业集团顾北矿风井井筒冻结设计为原型, 利用安徽理工大学冻土实验室的冻结模型

2013-01-28 收到第 1 稿, 2013-04-18 收到修改稿.

1) 安徽省自然科学基金 (050440501), 高等学校博士学科点专项科研基金 (200803610004) 资助项目.

2) 吕晶晶, 1987 年生, 女, 硕士, 主要从事冻土力学及岩土与地下工程研究工作. E-mail: wwq87095@sina.com

试验系统展开人工多排管冻结模型试验来获得相关实验数据并分析水热力三场耦合作用在冻结过程中的影响, 这为建立三场耦合模型提供试验数据基础并对工程提供了可靠的理论指导^[10-13].

1 模型试验的设计

1.1 模型试验的相似准则

模型试验利用天然的土体作为试验材料, 按照相似准则制作模型, 并在室内进行人工冻结实验, 从而得到水热力三场耦合的变化特性.

(1) 温度场相似准则

实验模型的数学模型应该与原型保持一致, 考虑到冻结地层的不稳定导热因素, 利用量纲分析法得到, 冻结温度场的相似准则^[14]如下

$$\varphi(F_0, K_0, R, \theta) = 0 \quad (1)$$

其中, $F_0 = at/\xi^2$ (傅里叶准则), a, t 分别为导温系数和时间, ξ 为冻结锋面位置坐标; $K_0 = q_0/TC$ (柯索维奇准则), q_0 为单位土体冻结时放出的潜热, T, C 分别为土体温度和热容量; θ 表示温度准则; R 表示几何准则.

(2) 水分场相似准则

冻结过程中会发生水分迁移现象^[15], 其实质为冻结过程中的湿度场问题. 根据温度场和湿度场具有相同的微分方程, 经过相似转换可以得到湿度场的准则.

傅里叶准则 $F_h = bt/r^2$, b, r 分别为导湿系数和柱坐标, 几何准则 $R = H/r$, 湿度准则 $\Theta = H/H_0$, H, H_0 为湿度.

由此可见, 水分迁移过程和冻结过程有相似的数学模型, 且均满足傅里叶准则. 所以若冻结初始条件和边界条件相似, 加上模型和原型的岩土性质相同, 则只要温度场是相似的, 湿度场可以达到“自模拟”而相似. 由相似准则推导得冻结壁模型试验和原型的相似关系如表 1 所示.

表 1 冻结壁模型试验和原型的相似关系

序号	物理量	几何相似比
1	内摩擦角、空隙比、泊松比、 冻结温度、含水量	1
2	应力、位移、弹性模量	1:n
3	冻结时间缩比、冻土扩展速度	1:n ²

1.2 模型的参数设计

模型试验中的几何尺寸通常取冻结圆柱影响半径的 3~5 倍, 根据试验装置的几何尺寸 (模型试验坑是直径为 3 m, 深度为 1.4 m 的圆形混凝土结构), 确定原型与模型几何相似比为 8. 根据顾北煤矿冻结设计的原型, 进行模型几何尺寸的设定, 模型和原型的参数如表 2 所示.

表 2 原型与模型参数

相似指标内容	模型	原型	
内圈冻结孔	圈径/m	1.70	13.6
	孔数/个	18	18
	开空间距/m	0.30	2.374
中圈冻结孔	圈径/m	2.35	18.8
	孔数/个	24	24
	开空间距/m	0.15	1.23
外圈冻结孔	圈径/m	2.88	23.0
	孔数/个	46	46
	开空间距/m	0.21	1.707
土层初始温度/°C	30	30	
盐水温度/°C	-30	-30	
冻结管直径/mm	20	159	

1.3 试验中测量元件的选择

模型试验所用的测量元件: (a) 根据模型的尺寸, 设计压力盒规格 $\phi 35$ mm, 受力膜厚度 0.5 mm, 量测精度 0.01 MPa; (b) 采用 $\phi 0.52$ mm 的铜丝和 $\phi 0.52$ mm 的康铜丝自制热电偶, 通过 YE2532 静态应变仪定时自动采集; (c) 采用 SWR-2 型土壤水分传感器量测水分场, 量测参数为土壤容积含水量, 量测精度为 0%~50% 范围内为 $\pm 2\%$.

1.4 试验的过程

(1) 制冷系统试循环, 采用进口全封闭式压缩机与自动控温系统进行制冷, 试验盐水温度为 $-32^\circ\text{C} \sim -30^\circ\text{C}$;

(2) 模型填土分层制作, 实验中的土取自现场, 各项物理性质一致如表 3 所示;

表 3 实验土样常规土的一些物理力学性质

土名	深度/ m	含水率/ %	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	湿密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和度/ %	比重	塑性 指数
黏土	390	29	1.68	2.11	97.7	2.66	21.1

(3) 进行模型冻结管的布置与埋设, 各圈管的位置及间距按表 2 设置;

(4) 元件的布置与埋设: 当模型内填土达到模型一半高度时, 开始在此水平面埋设元件, 将水分传感器和压力盒分别埋设在内圈管以内 20 cm 处、内圈管旁 6 cm 处、内圈与中圈管之间、中圈管 6 cm

处、中圈与外圈管之间、外圈管旁 6 cm 处. 在主、界面分别设 18 只和 16 只热电偶, 同时在压力传感器和水分传感器的埋设位置埋设热电偶装置, 来获得三者之间的相互关系. 元件的布置与埋设情况如图 1 所示.

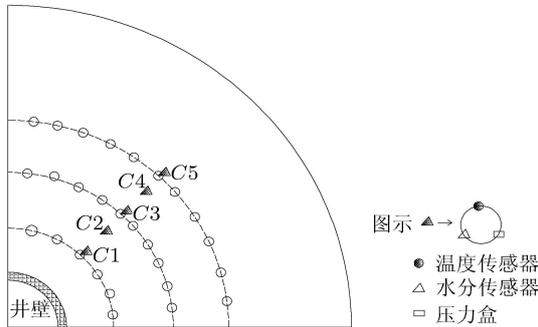


图 1 模型试验元件布置图

(5) 完成模型制作后, 开始模型冻结系统的循环并建立量测系统, 实现软件控制的各测量元件数据的自动采集, 进行试验数据的分析处理.

2 模型试验结果及分析

模型试验得到了大量的温度、冻结压力和含水量变化的数据, 通过对试验数据的分析、处理, 分别得到如下温度场、冻结应力场和水分迁移的

分布规律.

2.1 冻结温度场形成特征

冻结温度场是在研究冻结过程中, 井筒的温度随时间变化的规律, 它是一个边界发生移动的、具有相变的不稳定性导热问题, 其发展性状的研究是研究冻结壁形成的关键问题. 根据冻结温度场的测量数据, 可以判断出冻结壁的交圈 (随着冻结时间的延长, 同一圈冻结管所形成的单根冻土圆柱发展成封闭的圆筒形状) 时间和平均温度. 由模型试验获得的多排管冻结温度场形成交圈的时间如表 4 所示.

表 4 冻结壁交圈时间和冻土扩展速度计算表

冻结管	内圈管	中圈管	外圈管	内、中圈管	中、外圈管
交圈时间/h	47	24	34	41	44
原型交圈时间/d	72	36	51	61.5	66
冻结管间距/m	0.40	0.21	0.28	0.45	0.51
冻土扩展速度/ (mm · h ⁻¹)	4.16	4.37	4.1	5.5	5.1
原型扩展速度/ (mm · d ⁻¹)	16.7	17.5	16.5	22.0	22.8

通过对模型试验中各个测点温度监测, 可以得到各区域冻土的交圈时间以及交圈前冻土的发展规律, 冻结过程各测点相应的温度随时间变化曲线如图 2 所示.

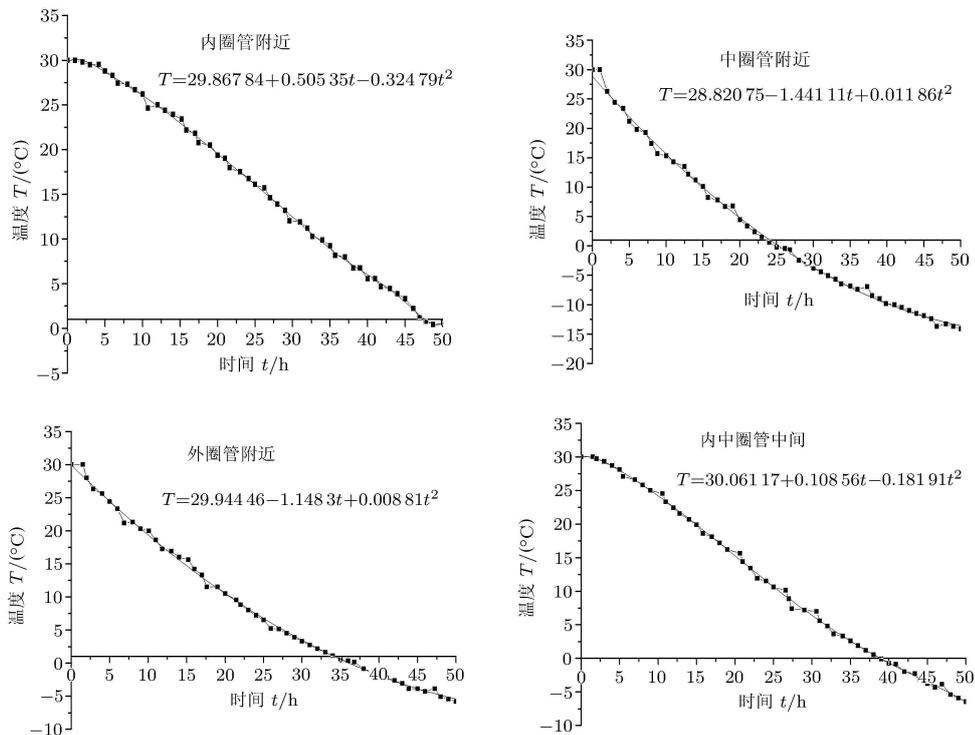


图 2 各测点温度与时间的关系曲线

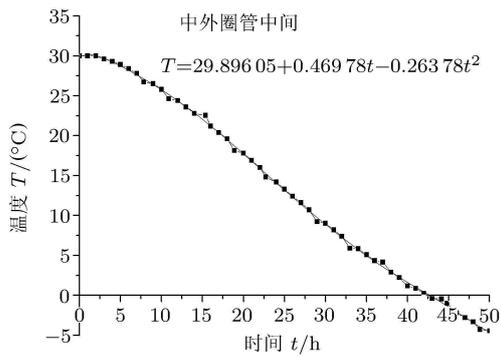


图2 各测点温度与时间的关系曲线(续)

由表4可以看出不同区域交圈时间与冻结管间距、排距密切相关. 冻土扩展速度与冻结管布置间距

密切相关. 同一模型中, 在制冷量相等的情况下, 中圈管冻结管布置较密, 该区域冻土扩展速度最大, 达到 4.37 mm/h; 而内圈管冻结管布置较疏, 该区域冻土扩展速度最小, 为 4.16 mm/h.

由图2可见, 内圈冻结管附近、相邻中圈冻结管附近、相邻外圈管附近、内圈与中圈冻结管中间及中圈与外圈中间土体冻结温度随时间的变化曲线都可以用图中的二次曲线拟合. 其中二次项系数均很小, 所以可以近似为直线.

2.2 冻结压力场分布特征

试验中冻结压力的实测, 分别得到了各个测点处的冻结压力发展情况, 如图3所示.

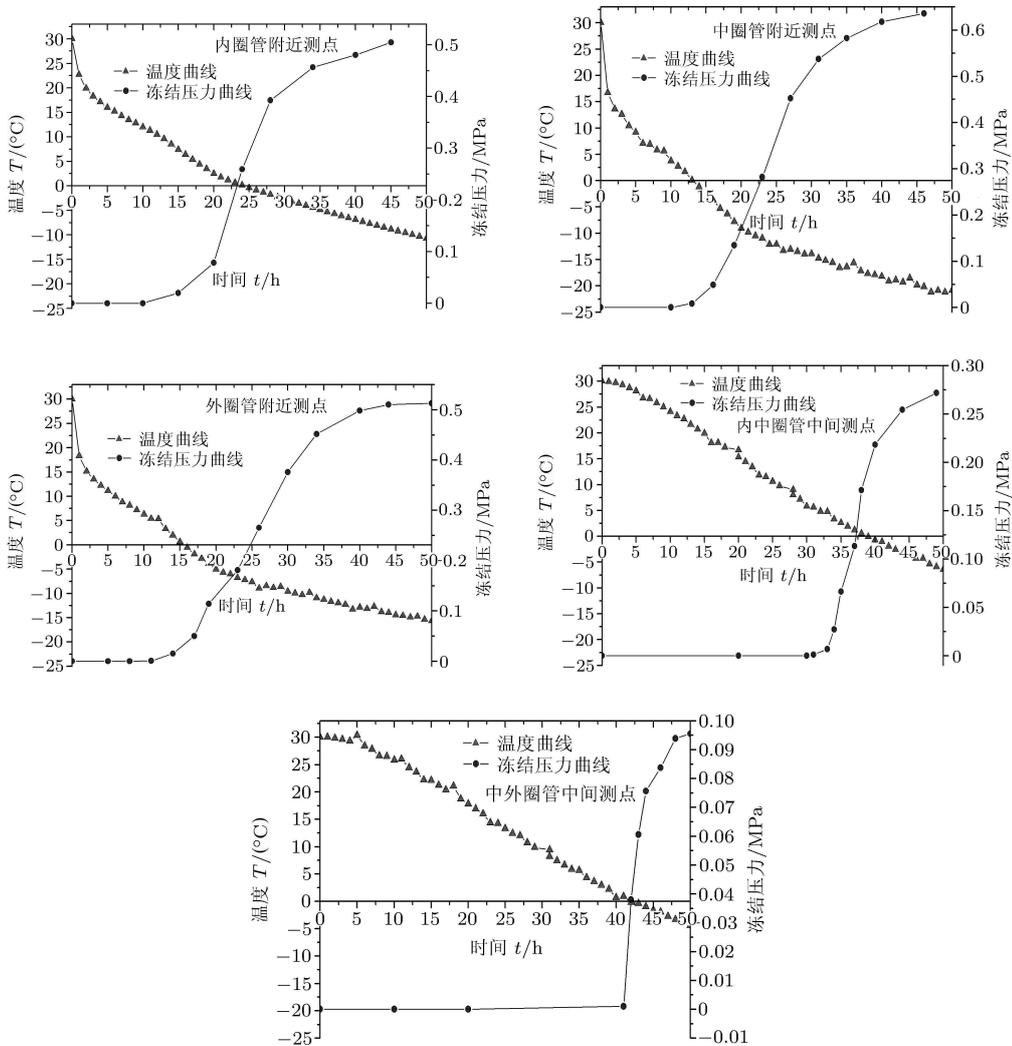


图3 各测点冻结压力随时间的变化曲线

从图3可以看出内、中、外圈管附近3处测点位置, 冻结开始后该位置很快就受到冻结的影响, 随着温度的降低, 冻结压力不断增长. 内圈附近

数值最大为 0.5 MPa, 中圈附近最大为 0.65 MPa, 是试验中冻结压力测得的最大值, 外圈附近最大为 0.51 MPa; 而内中圈管中间测点当温度降至 5°C 以

下时, 冻结压力开始逐渐增大, 土体温度降至冻结温度附近时, 冻结压力增长最快, 该测点冻结压力最大为 0.275 MPa; 中外圈管中间测点温度降至 0°C 及以下时, 冻结压力开始迅速增大, 土体温度降至冻结温度附近时, 冻结压力增长最快, 该测点冻结压力最大为 0.1 MPa. 由此可知, 多圈管冻结壁内部的冻结压力大小及发展情况是很不均匀的, 与冻结管的位置和冻结温度有密切的关系, 离冻结管越近的地方,

冻结压力越大, 反之越小, 并且冻结压力的增长最快时间即是土体温度降至冻结温度的时候.

2.3 冻结土体含水量变化特征

冻结会造成土体的内部温度变化, 从而导致土体的水分迁移. 为了掌握多圈管冻结下水分场的迁移特性, 在模型试验中设置了 5 个含水量测定元件, 用以监测冻结过程中含水量的变化情况, 各测点含水量变化与冻结温度变化关系如图 4 所示.

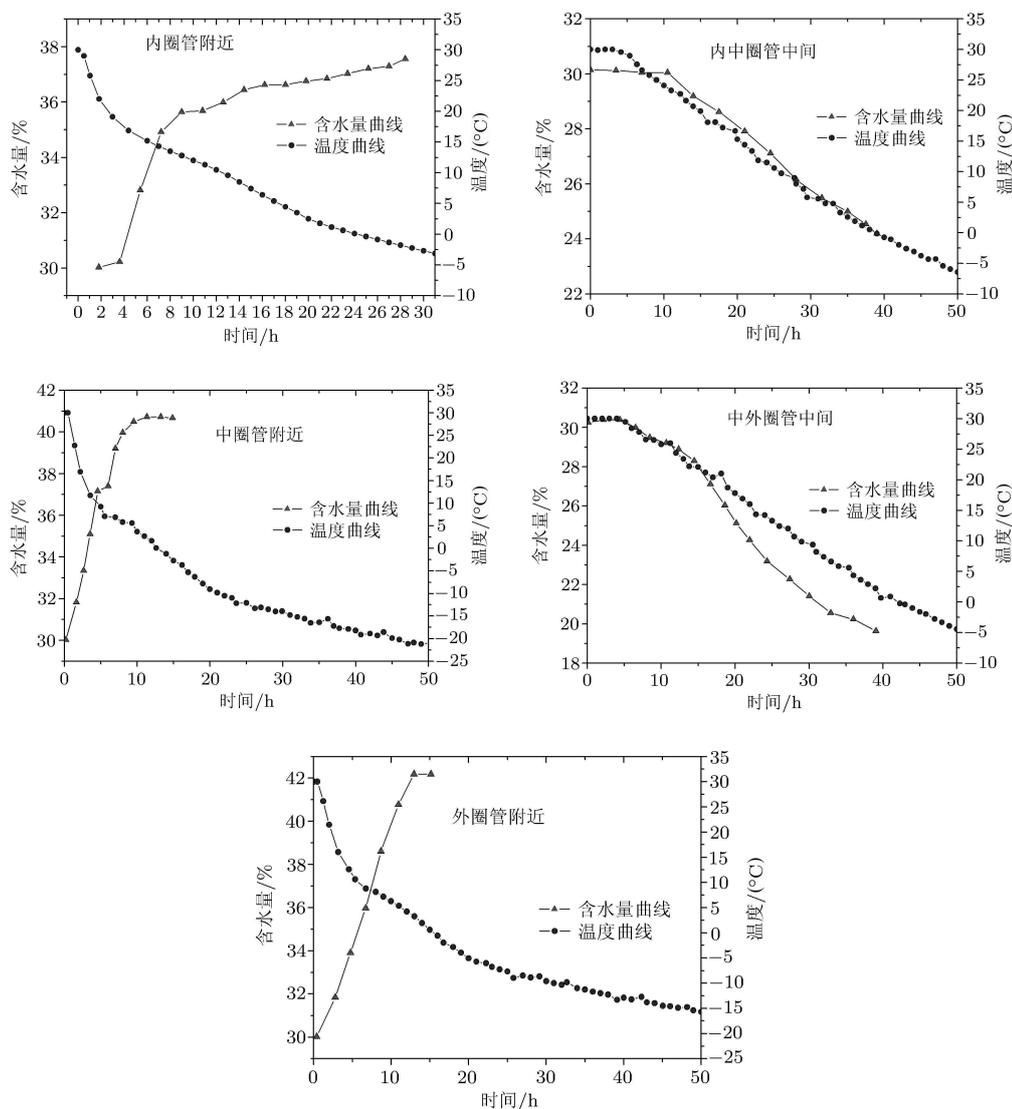


图 4 各测点含水量变化与冻结温度的关系

从图 4 各测点含水量变化曲线可以看出: 在冻结的开始, 内、中、外圈管附近 3 处测点的土体含水量很快表现出增加的趋势, 当土体温度快速降低时, 测点处含水量不断增加, 当土体的温度等于冻结温度时, 土体冻结, 水分迁移结束, 含水量的变化曲线终止, 在整个冻结过程中内圈管附近测点处含

水量增加约 8%, 中圈管附近测点处含水量增加约 11%, 外圈管附近测点处含水量增加约 12.5%. 而在中外圈中间及内中管中间, 随着冻结温度的下降, 土体含水量一直呈现出下降的趋势, 土体水分不断向两边的冻结锋面迁移, 其含水量在不断减小. 在整个试验过程中, 中外圈中间处土体含水量下降约

10%，内中管中间处土体含水量下降约7%。

3 结论

通过模型试验和监测数据的分析处理，得到了多圈管冻结下的温度场、应力场及水分场的变化规律，获得了以下结论：

(1) 冻结壁的交圈时间及冻土扩展速度与冻结管间距、排距密切相关；

(2) 多圈管冻结壁内部的冻结压力大小及发展情况是很不均匀的，与冻结管的位置和冻结温度有密切的关系，离冻结管越近的地方，冻结压力就越大，反之则越小，并且冻结压力的增长最快时间即是土体温度降至冻结温度的时候；

(3) 内、中、外圈管附近3处测点的土体含水量在冻结开始时就很快表现出增加的趋势，当土体温度快速降低时，测点处含水量不断增加，而在中外圈中间及内中管中间处，土体水分不断向两边的冻结锋面迁移，其含水量在不断减小。

在多圈管冻结中，两圈管之间土体的性状与单圈管附近土体的性状，在温度场、冻结应力场和水分场的形成和分布上都有明显的差异。因此，在冻结壁厚度的设计时，应充分予以考虑它们的影响。

参考文献

- 张婷, 杨平. 土体单向冻结对土中水分迁移的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(1): 117-121 (Zhang Ting, Yang Ping. Effects of unilateralist freezing on the moisture migration of soil. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition)*, 2013, 37(1): 117-121(in Chinese))
- 柯洁铭, 杨平. 冻土冻胀融沉的研究进展. 南京林业大学学报, 2004, 28(4): 105-108 (Ke Jieming, Yang Ping. The advance of research on the frost heave and thawing settlement of frozen soil. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2004, 28(4): 105-108(in Chinese))
- 张钊. 冻土的温度水分应力及其相互作用. 兰州: 兰州大学出版社, 1990
- Harlan RL. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resources Research*, 1973, 9(5): 1314-1323
- Shen M, Ladanyi B. Modeling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil. *Cold Regions Science and Technology*, 1987, 14(3): 237-246
- 程知言. 浅表隧道工程多冷源冻结温度、应力、水分场耦合研究. [博士学位]. 长沙: 中南大学, 2003 (Cheng Zhiyan. Coupling of temperature, stress and moisture migration in shallow tunneling using multi-freezing pipes. [PhD Thesis]. Changsha: Zhongnan University, 2003 (in Chinese))
- 赖远明, 吴紫汪, 朱元林. 寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 529-533 (Lai Yuanming, Wu Ziwang, Zhu Yuanlin. Nonlinear analyses for the couple problem of temperature, seepage and stress fields in cold region tunnels. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(5): 529-533 (in Chinese))
- 李宁, 陈波, 陈飞熊. 寒区复合地基的温度场、水分场与变形场三场耦合分析. 土木工程学报, 2003, 36(10): 66-71 (Li Ning, Chen Bo, Chen Feixiong. Heat-moisture-deformation coupled model for composite foundation in cold zone. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(10): 66-71 (in Chinese))
- 王铁行, 李宁, 谢定义. 土体水热力耦合问题研究意义、现状及建议. 岩土力学, 2005, 26(3): 488-493 (Wang Tiexing, Li Ning, Xie Dingyi. Necessity and means in research on soil coupled heat-moisture-stress issues. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(3): 488-493 (in Chinese))
- 崔广心. 相似理论与模型试验. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990
- 汪仁和, 李栋伟. 人工多圈管冻结水热耦合数值模拟研究. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 355-359 (Wang Renhe, Li Dongwei. Research on hydro-thermal coupling numerical simulation with artificial multi-freezing-tube cycles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 355-359 (in Chinese))
- 崔广心. 冻结法凿井的模拟试验原理. 中国矿业大学学报, 1989, 18(1): 59-68 (Cui Guangxin. The principle of model test for freezing shaft sinking. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1989, 18(1): 59-68 (in Chinese))
- 柴军瑞. 岩体渗流-应力-温度三场耦合的连续介质模型. 红水河, 2003, 22(2): 18-20 (Chai Junrui. Continuum model for coupled seepage, stress and temperature fields in rock mass. *Hong Shui River*, 2003, 22(2): 18-20 (in Chinese))
- 冯劲梅. 流体力学. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010
- 孔令坤. 土体水分迁移试验及数值模拟. [硕士学位论文]. 长安: 长安大学, 2009 (Kong Lingkun. Test of moisture migration in soil and numerical simulation. [Master Thesis]. Chang'an: Chang'an University, 2009 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)