

DOI: 10.11779/CJGE201406020

深厚表土中冻结壁与井壁相互作用的数值分析

王衍森^{1,2}, 文凯^{1,2}

(1. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室(中国矿业大学), 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 冻结壁对井壁的作用力构成了深厚表土中冻结井外层井壁的外载; 其增长规律与冻结壁与井壁之间的聚苯乙烯泡沫板压缩性能密切相关。为研究深厚表土中冻结井外壁外载的取值方法, 以华东某冻结凿井工程为背景, 基于冻土的弹塑性及蠕变本构方程, 开展了冻结凿井过程中冻结壁与井壁相互作用的数值分析。结果表明: 冻结壁对井壁的流变作用力极为显著; 泡沫板的存在及其压缩性, 可显著降低冻结壁作用力, 尤其是弹塑性及流变作用力 P_{epc} 的数值, 并影响其增长速度及增长规律; 随着泡沫板压缩性降低直至泡沫板取消, 冻结壁作用力由低速、近似线性增长, 变为高速、非线性增长, 从而易对井壁的早期安全构成威胁。因此, 冻结凿井工程设计与施工中, 应针对冻结壁的流变变形特性, 审慎地研究确定泡沫板的材质及厚度。

关键词: 冻结法凿井; 冻结壁; 井壁; 相互作用; 数值分析

中图分类号: TU445; TD265

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)06-1142-05

作者简介: 王衍森(1973-), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩土特殊施工技术方面的教学和科研工作。E-mail: yswang@cumt.edu.cn。

Numerical analysis of interaction between freezing wall and shaft lining in deep alluvia

WANG Yan-sen^{1,2}, WEN Kai^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The load of outer shaft lining during freeze sinking mainly originates from the interaction between the freezing wall and the outer shaft lining, whose growth greatly relates with the compressibility of polystyrene foam board between them. In order to study the load in deep alluvia, taking a freeze sinking project in East China as the background, the interaction between the freezing wall and the shaft lining is studied by adopting the elastic-plastic and creep constitutive models for frozen soils. The results show that there is significant rheological interaction between the freezing wall and the shaft lining. The existence of foam board and its compressibility significantly reduce the value of the interaction pressure, especially P_{epc} and affect its growth rate and growth rule. During the gradual decrease of compressibility of foam board until the cancelation of foam board, the interaction pressure first approximately linearly grows at low speed, then gradually nonlinearly grows at high speed, and it will pose a threat to the early safety of shaft lining. Therefore, in the design and construction of freeze sinking, the foam materials and thickness should be carefully studied and determined based on the rheological characteristics of freezing wall.

Key words: freeze sinking; freezing wall; shaft lining; interaction; numerical analysis

0 引 言

深厚表土层冻结法凿井中, 冻结壁与井壁的相互作用力构成了冻结井外壁的外载; 而该荷载是井壁设计及其安全性分析的关键。国内工程技术人员曾对此开展了较为广泛的工程实测研究^[1-5], 为深厚表土中冻结井井壁结构的设计提供了重要的荷载取值依据。

冻结壁与井壁相互作用的复杂性, 一方面源自冻结壁温度场不均匀及深部冻土力学特性的复杂性, 另一方面, 与冻结壁与井壁之间铺设泡沫板等施工工艺

密切相关。国内学者曾采用理论解析、数值计算、模型试验等方法, 对冻结壁弹塑性或流变力学特性开展了一定的研究^[6-10]。胡向东^[11]基于弹塑性冻土本构, 荣传新等^[12]基于黏弹塑性冻土流变本构, 分别开展了

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174194); 国家高技术研究发展计划(863计划)课题(2012AA06A401); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-10-0771); 中国矿业大学中央高校基本科研业务费专项资金课题(2011JQP03)

收稿日期: 2013-08-20

开挖卸载条件下的冻结壁外载研究; 杨维好等^[13-15]考虑冻结壁与围岩的相互作用, 开展了冻结壁设计计算理论的研究。但上述研究, 普遍未深入考虑施工工艺进行冻结壁与井壁的相互作用研究。Wang 等^[16]曾考虑壁后泡沫板, 开展了冻结壁与井壁相互作用的理论分析, 但其理论模型难以考虑冻结温度场的不均匀性。

鉴于此, 本文将以华东某冻结凿井工程为背景, 基于深部冻土的蠕变本构及冻结壁温度场, 模拟井筒掘砌施工, 开展冻结壁与井壁相互作用的数值分析, 以获得冻结凿井施工工况条件下, 冻结壁对井壁相互作用力的增长规律, 为类似工程条件下冻结井外壁设计及施工提供借鉴。

1 工程概况

华东地区某矿井副井设计净直径为 7 m, 穿过厚达 567.7 m 的松散表土层; 设计采用双层现浇钢筋混凝土复合井壁, 内、外壁最大厚度均为 1.2 m, 混凝土最高强度等级为 C70。

井筒采用冻结法穿过表土与基岩风化带, 采用三圈孔冻结方案。冻结深度为 650 m, 冻结壁设计厚度为 11.5 m, 冻结壁平均温度在深度 400 m 处为 -15°C , 在深度 567.7 m 处为 -17°C ; 井帮控制温度在深度 400 m 处为 $-10^{\circ}\text{C} \sim -12^{\circ}\text{C}$, 在深度 567.7 m 处为 $-15^{\circ}\text{C} \sim -17^{\circ}\text{C}$ 。

井筒掘砌段高, 500 m 以深控制在 2.0~2.5 m, 冻结壁与井壁间铺设厚 75 mm 的聚苯乙烯泡沫塑料板。

泡沫板压缩过程可分为 3 个阶段 (图 1): 第 I 阶段近似线性压缩, 压缩率不大于 75%; 第 II 阶段为非线性压缩, 压缩率介于 75%~95% 之间; 第 III 阶段基本压实, 压缩率超过 95% 后, 泡沫板近似刚性。

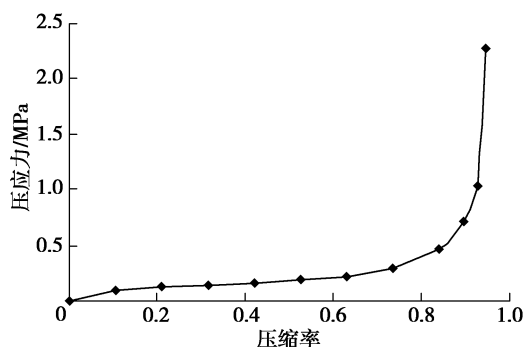


图 1 聚苯乙烯泡沫板压缩曲线

Fig. 1 Compression curves of polystyrene foam board

2 数值模型与计算方案

2.1 数值计算模型

忽略冻结孔偏斜, 采用 ANSYS 程序建立冻结法凿井地层冻结—掘砌过程模拟的参数化轴对称有限元

模型, 如图 2 所示。模型由已支护段、模拟开挖段、下卧层 3 部分组成, 具有以下特点: ①可模拟多种冻结壁、井壁几何特征及岩土层; ②通过温度场、力学场的顺序耦合, 实现冻土参数的温度非线性模拟; ③可通过模型中竖向条带的划分与人为赋值, 模拟与温度相关的部分特殊参数; ④可模拟任意段高、任意速度的分层开挖支护。

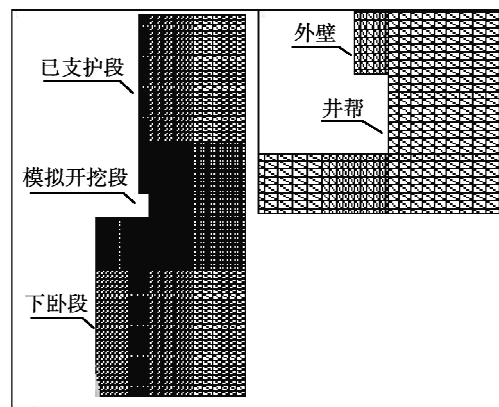


图 2 冻结法凿井施工过程模拟的数值模型

Fig. 2 Numerical model for freeze sinking shaft

2.2 边界条件与荷载

温度场边界条件: 顶、底面属于绝热边界; 右侧竖向边界属于恒温边界 (原始地温)。

温度场模型荷载: 在冻结轴面上, 参照冻结壁形成过程之瞬态温度场的计算结果, 按轴面平均温度施加温度荷载; 模型初始温度为地温。

应力场边界条件: 底部边界施加竖向位移约束 ($U_Y=0$)。

应力场模型荷载: 顶面施加土覆地层自重 (按深度及平均重度 20 kN/m^3 计算); 右侧竖向边界施加均布水平地压 (按 $P=0.012H$, 单位为 MPa; H 为地层深度, 单位为 m, 取 550 m); 忽略模型内土体自重。

2.3 材料模式与参数

井壁混凝土 (C70) 视为线弹性材料, 弹性模量为 40 GPa, 泊松比为 0.2。

冻土采用双线性强化弹塑性本构模型并考虑蠕变。屈服强度按单轴抗压强度的 $1/2 \sim 2/3$ 取值, 强化段模量为弹性模量的 $1\% \sim 3\%$, 近似理想弹塑性, 模拟超过长时强度后发生屈服流动的特点。

冻土的蠕变方程按以下回归公式:

$$\varepsilon_c = A_T \sigma^B t^C, \quad (1)$$

式中, ε_c 为蠕变应变; A_T 是与温度有关的蠕变参数, $(\text{MPa})^{-B} \cdot \text{h}^{-C}$; B , C 均是与应力时间有关的无量纲蠕变参数; σ 是蠕变应力 (MPa); t 是蠕变时间 (h)。因冻结壁蠕变属于三维应力下的蠕变, 单轴蠕变试验

参数，需先转换为三维等效应力、应变下的参数。

根据冻结法凿井工程的冻土试验报告，确定数值计算所需的冻土主要力学参数见表 1、2。

表 1 冻土的基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of frozen soils

温度/℃	弹性模量/MPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa
-25	556	0.26	9.0
-20	370	0.28	7.5
-15	276	0.33	5.9
-10	183	0.38	3.5
-2	150	0.39	1.0

表 2 冻土的三轴蠕变参数

Table 2 Creep parameters of frozen soils

温度/℃	A	B	C
-20	1.029×10^{-3}	0.725	-8.29
-15	9.887×10^{-4}	0.732	-0.8648
-10	3.158×10^{-4}	2.102	-0.9079

聚苯乙烯泡沫板视为分段线弹性材料，确定不同阶段的弹模。第 I 阶段弹模 $E=0.42$ MPa；第 II 阶段弹模 $E=10$ MPa（如 I，II 阶段合并，平均弹模为 2.4 MPa）；第 III 阶段泡沫板压实，视为弹模与井壁相同。泡沫板泊松比对计算结果影响很小，按 0.3 取值。

2.4 数值计算方案

针对井筒开挖以及冻结壁蠕变对已浇筑井壁的作用力问题，分别按冻土的弹塑性本构（EP）、弹塑性及蠕变本构（EPC），开展冻结壁与井壁相互作用力的数值分析。计算方案见表 3。

表 3 冻土壁与井壁相互作用的数值计算方案

Table 3 Numerical schemes for interaction

方案编号	冻土本构	泡沫板弹模/MPa	开挖段次/段	计算时长/h
A	EP/EPC	0.42	5	140
B	EP/EPC	2.40	5	140
C	EP/EPC	无泡沫板	5	140

数值模拟基本步骤：①首先按稳态问题近似模拟冻结壁温度场。因深部开挖时冻结温度场已接近于稳态，精度可接受。②模拟自重应力场。地层初始应变可完全消除；受温度场不均造成的土体弹模不均的影响，自重应力与实际略有差异，属于近似模拟。③连续模拟掘砌 5 个段高（段高 2.5 m，开挖 20 h，支护 8 h）；重点对第 1 段高的井壁受力开展分析。

3 数值计算结果分析

不同计算方案、冻土本构模式下，冻结壁对井壁的作用力（以下简称“冻结壁作用力”）的计算结果见表 4，相应的曲线见图 3。其中， P_{ep} 、 P_{epc} 分别是冻土视为弹塑性介质、弹塑性及流变介质时的冻结壁作用力； P_h 是指冻结壁外侧的水平地压；表 4 与图 3 中的

时间，是从首段井壁浇筑完成后算起的时间。

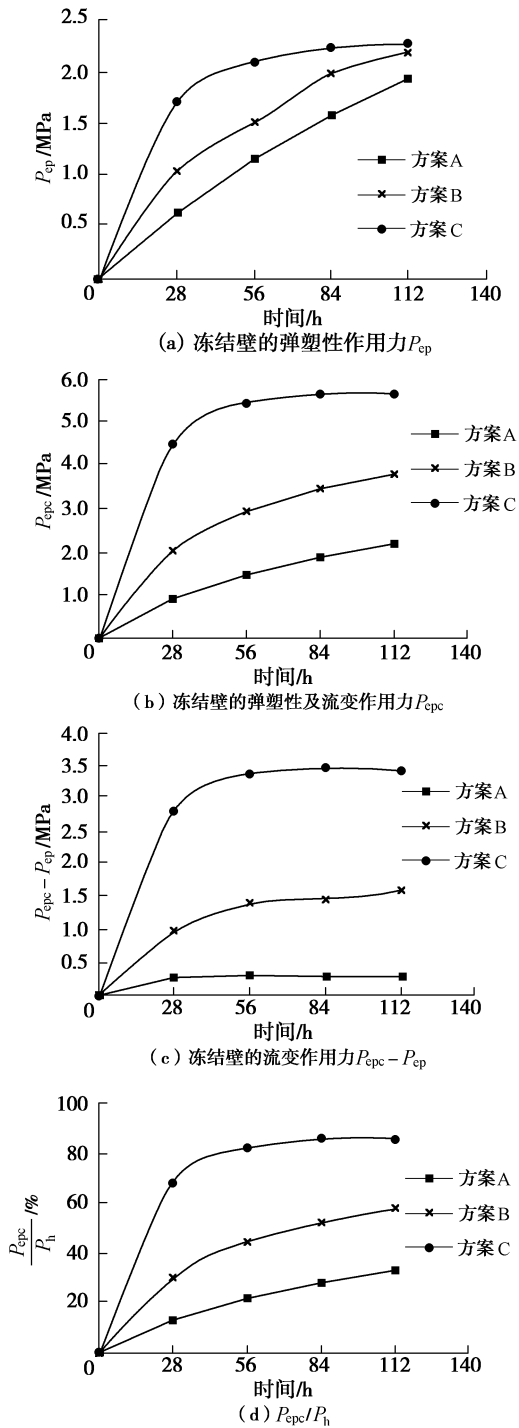


图 3 冻结壁与井壁的相互作用力

Fig. 3 Interaction pressure between freezing wall and shaft lining

由表 4 及图 3 中的冻结壁作用力数值及其增长曲线，分析可得以下结论：

（1）井壁与冻结壁间铺设高压压缩性泡沫板时（方案 A），冻结壁作用力（ P_{ep} 、 P_{epc} ）呈现出低速、近似线性增长的规律；而随着泡沫板弹模增大直至取消（方案 B、C），冻结壁作用力呈现出快速、非线性增长的规律。

表 4 冻结壁作用力的计算结果

Table 4 Interaction pressure between freezing wall & shaft lining (MPa)

计算 方案	冻结壁 作用力	时间/h			
		28	56	84	112
A	P_{ep}	0.616	1.150	1.580	1.917
	P_{epc}	0.882	1.448	1.863	2.184
	$P_{epc}-P_{ep}$	0.266	0.298	0.283	0.267
	P_{epc}/P_h	13.4	21.9	28.2	33.1
B	P_{ep}	1.033	1.517	1.991	2.205
	P_{epc}	2.014	2.918	3.454	3.810
	$P_{epc}-P_{ep}$	0.981	1.401	1.463	1.605
	P_{epc}/P_h	30.5	44.2	52.3	57.7
C	P_{ep}	1.71	2.08	2.228	2.267
	P_{epc}	4.537	5.451	5.684	5.685
	$P_{epc}-P_{ep}$	2.827	3.371	3.456	3.418
	P_{epc}/P_h	68.7	82.6	86.1	86.14

以 P_{epc} 为例, 由表 4 中计算结果可见, 方案 A 中首段井壁浇筑后第 28, 56, 84, 112 h, P_{epc} 分别达到 0.882, 1.448, 1.863, 2.184 MPa, 占永久水平地压 P_h 的 13.4%, 21.9%, 28.2%, 33.1%; 而方案 C (无泡沫板) 中, 相同时刻 P_{epc} 依次达到 4.537, 5.451, 5.684, 5.685 MPa, 分别占 P_h 的 68.7%, 82.6%, 86.1%, 86.14%。

由图 3 (a)、3 (b) 可见: 方案 B、C 中, 第 2 个段高开挖时 (对应于 0~28 h), 冻结壁作用力 P_{ep} , P_{epc} 增速最快; 而后续段高开挖时, 增速明显减小。

鉴于井壁浇筑后其强度增长需要一定的时间, 因此, 冻结壁作用力增长缓慢、数值较小的方案 A, 显然比方案 B、C 更有助于保证井壁结构的早期安全。

(2) 泡沫板存在与否及其弹模相同的条件下, 考虑冻土流变时的冻结壁作用力 P_{epc} , 明显高于不考虑流变时的冻结壁作用力 P_{ep} 。

如忽略冻土弹塑性变形与流变的耦合效应, 则“ $P_{epc}-P_{ep}$ ”可视为仅由冻土流变诱发的“冻结壁流变作用力”。由表 4, 图 3 (c) 可见, 首段井壁浇筑后第 28 h, 方案 A、B、C 中得到的冻结壁流变作用力 ($P_{epc}-P_{ep}$) 分别为 0.266, 0.981, 2.827 MPa, 与 P_{ep} 相比增幅分别达 43.2%, 95.0%, 165.3%; 浇筑后 112 h, 方案 A, B, C 得到 $P_{epc}-P_{ep}$ 分别为 0.267, 1.205, 3.418 MPa, 增幅分别达 13.9%, 44.2%, 150.8%。可见, 冻结壁的流变作用力极为显著; 且无泡沫板时的冻结壁流变作用力远超出有泡沫板时。

(3) 泡沫板的存在及其高压缩性, 能显著降低冻结壁作用力, 尤其是弹塑性及流变作用力 P_{epc} 的量值。

由表 4, 图 3 (d) 可见, 首段井壁浇筑后 28 h, 方案 A、B、C 得到的 P_{epc} 分别占永久水平地压 P_h 的 13.4%, 30.5%, 68.7%; 浇筑后 112 h, P_{epc} 分别达到 P_h 的 33.1%, 57.7%, 86.1%。可见, 泡沫板弹模越小, 即压缩性越大, 则 P_{epc} 越小; 当井壁与冻结壁直接接

触 (无泡沫板) 时, 冻结壁作用力将取得最大值。
综上所述, 外壁与冻结壁之间聚苯乙烯泡沫板的铺设, 有利于冻结壁变形的释放, 不仅能有效地降低了冻结壁作用力的最终量值, 而且能改变其增长速度及增长规律; 尤其是通过降低井壁浇筑后面临的早期荷载, 提高井壁结构的安全性。鉴于此, 冻结法凿井工程中, 应针对冻结壁的流变特性, 审慎地确定壁后泡沫板的材质及厚度, 以获得合理的压缩变形性能。

4 结 论

通过对深厚冲积层中冻结壁与井壁相互作用的数值分析, 得到以下 3 点主要结论。

(1) 冻结壁流变作用力显著, 且无泡沫板时, 冻结壁流变作用力远超出有泡沫板时。泡沫板弹模分别为 0.41, 2.4 MPa 及无泡沫板时, 首段井壁浇筑后 112 h, 冻结壁的弹塑性及流变作用力 P_{epc} 与弹塑性作用力 P_{ep} 相比, 增幅分别达 13.9%, 44.2%, 150.8%。

(2) 泡沫板的存在及其压缩性可显著降低冻结壁作用力, 尤其是弹塑性及流变作用力 P_{epc} 的量值。泡沫板压缩性越高, P_{epc} 越小; 井壁与冻结壁直接接触时, P_{epc} 取得最大值。

(3) 泡沫板及其压缩性能显著影响冻结壁作用力的增长速度及增长规律。随着泡沫板的弹模增大直至取消, 冻结壁作用力 (P_{ep} , P_{epc}) 逐渐由低速、近似线性增长, 变为快速、非线性增长的规律。

鉴于泡沫板的压缩性能对冻结井井壁的早期安全具有重要影响, 建议工程设计与施工中, 应针对冻结壁的流变变形特性, 审慎确定泡沫板的材质及厚度。

参考文献:

[1] 苏力凡. 冻结井外力的实测研究[J]. 煤炭学报, 1981, 6(1): 30 - 38. (SU Li-fan. Study of strata pressure on lining in frozen shaft[J]. Journal of china coal society, 1981, 6(1): 30 - 38. (in Chinese))

[2] 马英明, 郭瑞平. 冻结凿井中冻结壁位移规律及影响因素的研究[J]. 冰川冻土, 1989, 11(1): 20 - 33. (MA Ying-ming, Guo Rui-ping. Study on regularity and influence factors of displacement of frozen soil wall in freeze sinking[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1989, 11(1): 20 - 33. (in Chinese))

[3] 姚直书, 程桦, 张国勇, 等. 特厚冲积层冻结法凿井外层井壁受力实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(6): 49 - 52. (YAO Zhi-shu, CHENG Hua, ZHANG Guo-yong, et al. Research on situ measurement of outer shaft wall in freezing sinking shaft in special thick alluvium[J]. Coal Science and

- Technology, 2004, **32**(6): 49 – 52. (in Chinese))
- [4] 王衍森, 薛利兵, 程建平, 等. 特厚冲积层竖井井壁冻结压力的实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(2): 207 – 212. (WANG Yan-sen, XUE Li-bing, CHENG Jian-ping, et al. In-situ measurement and analysis of freezing pressure of vertical shaft lining in deep alluvium[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(2): 207 – 212. (in Chinese))
- [5] 王衍森, 程建平, 薛利兵, 等. 冻结法凿井冻结壁内外部冻胀力的工程实测及分析[J]. 中国矿业大学学报, 2009, **38**(3): 303 – 308. (WANG Yan-sen, XUE Li-bing, CHENG Jian-ping, et al. In-situ measurement and analysis on frost-heave pressure inside and outside ice wall during freeze sinking[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, **38**(3): 303 – 308. (in Chinese))
- [6] 翁家杰, 张 铭. 冻结壁弹塑性反演分析[J]. 中国矿业大学学报, 1991, **20**(1): 36 – 43. (WENG Jia-jie, ZHANG Ming. Elasto-plastic Back Analysis of Frozen Soil Wall[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1991, **20**(1): 36 – 43. (in Chinese))
- [7] 郁楚侯, 杨 平, 汪仁和. 冻结壁三轴流变变形的模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 1991, **16**(2): 53 – 62. (YU Chu-hou, YANG Ping, WANG Ren-he. Simulation tests of triaxial creep deformation of ice wall[J]. Journal of China Coal Society, 1991, **16**(2): 53 – 62. (in Chinese))
- [8] 吴紫汪, 马 巍, 张长庆, 等. 人工冻结壁变形的模型试验研究[J]. 冰川冻土, 1993, **15**(1): 121 – 124. (WU Zi-wang, MA Wei, ZHANG Chang-qing, et al. Experimental research on deformation in model of artificially frozen wall[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, **15**(1): 121 – 124. (in Chinese))
- [9] 汪仁和, 李栋伟. 深井冻结壁粘弹塑性力学分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2006, **26**(2): 17 – 19. (WANG Ren-he, LI Dong-wei. Analysis of viscoelasto-plastic mechanics for frozen wall in deep-shaft[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2006, **26**(2): 17 – 19. (in Chinese))
- [10] 张向东, 张树光, 李永靖, 等. 冻土三轴流变特性试验研究与冻结壁厚度的确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(3): 395 – 400. (ZHANG Xiang-dong, ZHANG Shu-guang, LI Yong-jing, et al. Testing study on triaxial creep properties of frozen soil to determine thickness of frozen wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(3): 395 – 400. (in Chinese))
- [11] 胡向东. 卸载状态下与周围土体共同作用的冻结壁力学模型[J]. 煤炭学报, 2001, **26**(5): 507 – 511. (HU Xiang-dong. A mechanical model of interaction of frozen soil wall and surrounding earth mass in unloaded state[J]. Journal of China Coal Society, 2001, **26**(5): 507 – 511. (in Chinese))
- [12] 荣传新, 王秀喜, 程 桦, 等. 冻结壁稳定性分析的黏弹塑性模型[J]. 力学与实践, 2005, **27**(6): 68 – 72. (RONG Chuan-xin, WANG Xiu-xi, CHENG Hua, et al. A unified viscous-elastic-plastic constitutive model for stability analysis of frozen soil wall[J]. Mechanics and Engineering, 2005, **27**(6): 68 – 72. (in Chinese))
- [13] 杨维好, 杨志江, 韩 涛, 等. 基于与围岩相互作用的冻结壁弹性设计理论[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 516 – 519. (YANG Wei-hao, YANG Zhi-jiang, HAN Tao, et al. Elastic design theory of frozen soil wall based on interaction between frozen soil wall and surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 516 – 519. (in Chinese))
- [14] 杨维好, 杨志江, 柏东良. 基于与围岩相互作用的冻结壁弹塑性设计理论[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(1): 175 – 180. (YANG Wei-hao, YANG Zhi-jiang, BO Dong-liang. The elastic-plastic design theory of frozen soil wall based on the interaction between frozen wall and surrounding rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 175 – 180. (in Chinese))
- [15] 杨维好, 杜子博, 杨志江, 等. 基于与围岩相互作用的冻结壁塑性设计理论[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1857 – 1862. (YANG Wei-hao, DU Zi-bo, YANG Zhi-jiang, et al. Plastic design theory of frozen soil wall based on interaction between frozen soil wall and surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1857 – 1862. (in Chinese))
- [16] WANG Yan-sen, YANG Zhi-jiang, YANG Wei-hao. Viscoelastic analysis of interaction between freezing wall and outer shaft wall in freeze sinking, procedia earth and planetary science[C]// The 6th International Conference on Mining Science & Technology. Xuzhou, 2009: 612 – 620.