

深厚表土层冻结壁厚度计算方法研究

沈慰安, 王建州

(中煤第五建设有限公司, 江苏徐州 221000)

[摘要] 针对冻结法凿井工程面临的表土层厚度不断增加, 而现有冻结壁的设计理论滞后于工程实践的问题, 目前冻结壁的设计和计算多数是将冻结壁视为均质和各向同性的厚壁圆筒, 基于弹性和弹塑性理论进行计算的结果已经不能适用于未来深厚表土层的冻结法凿井工程, 文章综述了冻结壁厚度设计理论的研究现状和存在的问题, 并提出了考虑冻结壁径向非均匀的粘弹性分层计算模型, 考虑径向非均质条件, 井帮的径向变形较均质冻结壁小 25% ~ 30%, 可以充分发挥冻结壁的承载和变形性能, 有效减小冻结壁的厚度, 具有一定的工程应用价值。

[关键词] 冻结壁; 深厚表土层; 分层计算模型; 粘弹性

[中图分类号] TD82 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)11-0089-05

1 前言

冻结壁是冻结工程中的核心, 其强度和稳定性, 更是关系到整个工程的成败与经济效益。实际工程中的冻结壁, 从物理力学性质方面看是一个非均质、非各向同性、非线性体, 随着地压的逐渐增大, 由弹性体、粘弹性体向弹粘塑性体过渡。从几何形态看, 它是一个非轴对称的不等厚筒体。表征冻结壁强度和稳定性的综合指标是其厚度, 而反映冻结壁整体性能的综合指标是冻结壁的变形。因而, 控制冻结壁厚度是减小冻结壁变形的重要手段。

随着表土层厚度的增加, 冻结管布置由单圈、双圈增加到多圈; 冻结壁的厚度由初期的 3.5 ~ 4.5 m 扩大到 8 ~ 12 m; 冻结壁材料经历了完全弹性、部分弹性、部分塑性、完全塑性和完全粘性材料等多种假设。然而外层井壁压裂、冻结管断裂甚至淹井的事故仍然时有发生^[1]。因此在深厚表土层中用冻结法开凿立井是存在较多困难的, 且对现有冻结凿井理论和技术提出了巨大挑战, 被称为“世界级难题”。

众多的中外学者围绕冻结壁厚度计算方法开展了大量的工程实测、模型试验和数值模拟研究工作,

取得了大量的研究成果。文章主要针对冻结壁荷载、冻结壁厚度计算方法和冻结壁厚度模拟试验和实测几个方面进行研究和综述, 探讨现有的应用方法存在的问题和不足。

2 国内外研究现状

2.1 冻结壁的外载

冻结壁的外载是进行冻结壁设计的关键因素。冻结壁在开挖前即存在初始冻结应力场, 且有别于地层的原始地应力; 当开挖后冻结壁进入卸载状态, 冻结壁的外载又比原始水平应力小得多^[2]。总之冻结壁的外载是处于一个动态变化的过程。其大小与土颗粒的矿物成分、粒径组成、含水量及补给状况、温度场、水中易溶盐的成分和含量、原始地应力、掘进时冻结壁的变形等因素有关。

目前在设计冻结壁时不考虑冻结的影响, 仍视冻结壁的外载为永久地压值。计算冻结壁的水平地压目前多用重液公式:

$$P = 1.3\gamma_w H \quad (1)$$

式(1)中, γ_w 为水的重力密度, kN/m^3 ; H 为计算深度, m 。

孙家学和刘斌^[3]认为采用永久地压值作为冻

[收稿日期] 2011-08-25

[作者简介] 沈慰安(1959—), 男, 江苏泰兴市人, 教授级高级工程师, 研究方向为地下工程; E-mail: shenweian@cc5c.com

结壁外荷载,往往会导致设计冻结壁厚度不足,通过理论推导获得粘土冻结壁原始冻胀力计算公式。

马英明^[4]、陈远坤^[5]和李运来^[6]等基于实测冻结压力随深度的变化资料(见图1),回归得到冻结压力的经验公式:

$$\begin{cases} P_d = 1.74(1 - e^{-0.02H}) & H \leq 100 \text{ m} \\ P_d = 0.05H + 1 & H > 100 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_d = 1.265H/100 & H \leq 275 \text{ m} \\ P_d = 1.1587 + 0.00819H + 1 & H > 275 \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_d = 1.265H/100 & H \leq 275 \text{ m} \\ P_d = 7.3505 - 0.02943H + 0.00005599H^2 & H > 275 \text{ m} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, P_d 为冻结压力,MPa; H 是计算深度,m。

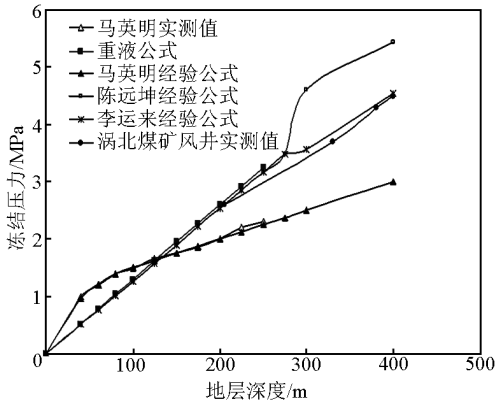


图1 冻结压力随深度变化曲线

Fig. 1 The freeze pressure changing with the depth

总体而言,受冻结凿井工程的实际条件限制,近年来冻结压力的实测研究仍然以400 m以内冲积层为主,特厚冲积层中的实测研究刚刚开始,测值结果的代表性有待深入研究。有必要大力开展冻结压力的实测工作,获得冻结压力随时间和深度的变化规律,对冻结压力的产成机理及计算和确定方法开展深入研究。

2.2 冻结壁厚度的计算方法

随着工程面临的表土层厚度增加,冻结壁厚度设计计算方法的不断发展,冻结壁材料经历了多种假设,如完全弹性、部分弹性、部分塑性、完全塑性和完全粘性材料等;冻结壁也由无限长厚壁圆筒到考虑掘砌条件的有限段高计算模型。

2.2.1 无限长厚壁圆筒

Lame 和 Clapeyron^[7]假设冻结壁为无限长弹性小变形厚壁圆筒(见图2(a)),得到冻结壁厚度的

计算公式:

$$E = a \left[\sqrt{\left(\frac{q}{q - 2p_0}\right) - 1} \right] \quad (5)$$

式(5)中, q 为冻土无侧限抗压强度; p_0 是上覆地层压力。

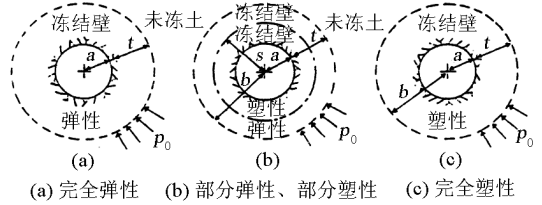


图2 冻结壁材料模式(据 Harris,1995)

Fig. 2 Material model of the frozen wall

Lame 公式冻结壁全部断面均处于弹性状态,不能充分利用材料的强度储备,计算结果偏于保守。实践表明,当表土层厚度小于100 m时,Lame 公式是适用的。但随着深度的增加以及岩压力和水压的增大,式(5)将因 $q < 2p_0$ 而失去物理意义,从而无法使用。

Domke(1915)将冻结壁视为理想弹、塑性体,允许冻结壁内圈进入塑性状态,如图2(b)所示。较Lame 公式更准确地反映冻结壁实际工作状态。我国至今仍沿用该式。使用该式的前提条件是外荷载 $p = (1.3 \sim 1.8)\gamma H$ (γ 为土容重, H 为计算深度)。

$$E = a \left[0.29 \left(\frac{p_0}{q}\right) + 2.30 \left(\frac{p_0}{q}\right)^2 \right] \quad (6)$$

但 Domke 公式忽略了塑性变形与冻结壁裸露时间的关系等不符合实际情况。关于公式中 q 的意义认识也有出入,有的认为是冻土的许用抗压强度或计算强度,有的把 q 当作持久抗压强度,这与原公式中 σ_c 的含义(指冻土的极限抗压强度)均有出入。该式在200 m左右的深厚表土层中均适用,但当深度达到或超过400 m时,由该式算得的冻结壁厚度将很大。

Vyaloy 按 Mohr 线性及非线性屈服条件,研究了无限长冻土筒的蠕变,假设冻土区为塑性区(见图2(c)),得出冻结壁厚度的计算公式:

$$E = a \left[\left(\frac{p_0}{q} \frac{2\sin\varphi}{1 - \sin\varphi} + 1\right)^{(1 - \sin\varphi)/2\sin\varphi} - 1 \right] \quad (7)$$

式(7)中, φ 为冻土内摩擦角。

国内外一些学者认为,在深厚表土层中冻结时,可使冻结壁全部进入塑性状态,以一定的安全系数

来保证冻结壁的安全度。

2.2.2 有限段高计算模型

上述公式都是按无限长厚壁圆筒分析计算的,实际工程中一般采用短段掘砌的方式施工冻结井筒,冻结壁在深井冻结时不可能同时暴露全长,掘进段高及其上下端固定情况对冻结壁稳定性的影响非常大。而按无限长厚壁筒的计算方法忽略了这些有利因素,导致计算的冻结壁厚度偏大。因此采用有限段高进行冻结壁厚度的计算更为符合实际。

当采用短段掘砌施工工艺时,冻结壁可简化为承受轴向压力,径向压力,冻结壁上下端具有不同固定程度,有限暴露段高的厚壁圆筒。在冻结壁暴露期间允许的最大位移为 μ_a ,见图3。

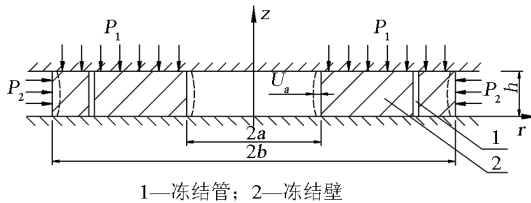


图3 有限段高冻结壁示意图

Fig. 3 Frozen wall sketch of the finite segment

A. 里别尔曼提出了用极限平衡理论计算冻结壁厚度,假设:a. 冻结壁外侧水平地压为 $p = \sum \gamma_i h_i$; b. 段高的上下端固定;c. 冻土为理想塑性体;d. 抗剪强度为抗压强度的一半;e. 冻土强度随时间变化;f. 按第三强度理论计算,得到:

$$E = \frac{\sum \gamma_i h_i}{\sigma_t} hK \quad (8)$$

式(8)中, h 为施工段高,m; K 为安全系数,一般取1.1~1.2; σ_t 为与冻结壁暴露时间相关的冻土长时抗压强度,MPa。

利用第四强度理论,前苏联学者维亚洛夫、扎列茨基采用与里别尔曼基本相同的假设,考虑了冻土暴露段高的支撑条件,得到:

$$E = \sqrt[3]{\kappa} \frac{\rho h}{\sigma_t} \quad (9)$$

式(9)中: κ 为支撑条件系数,井内未冻实,可视为上端固定,下端不固定, $\kappa = 1$;井内冻实,可视为上下两端均固定, $\kappa = 0.5$ 。

维亚洛夫、扎列茨基根据恒荷载作用下的冻土蠕变试验结果,提出了按照变形条件计算的有限段高的冻结壁厚度的计算公式:

$$E = a \left\{ \left[1 + (1 - \xi) \frac{(1 - m)p}{3^{-\frac{1+m}{2}} A(T, \theta)} \left(\frac{h}{R_a} \right)^{1+m} \left(\frac{R_a}{u_a} \right)^m \right]^{\frac{1}{1-m}} - 1 \right\} \quad (10)$$

式(10)中, a 是井筒内半径,m; ξ 为冻结壁暴露段上下约束系数, $0 \leq \xi \leq 0.5$;若上端固定,下端不固定, $\xi = 0$;若下端基本固定, $\xi = 0.5$; m 为冻土强化系数,由试确定; p 是冻结壁水平地压,MPa; $A(T, \theta)$ 是随时间和温度变化的冻土变形模量,一般由试验确定,MPa; u_a 为冻结壁内缘容许最大径向位移,m。

Klein、Auld应用了由Tresca、Mises、Mohr - Coulomb、Drucker - Prager(塑性)和Klein(粘性)模式描述的带内压无限长厚壁圆筒的冻结壁厚度计算公式。

2.3 冻结壁厚度的试验和实测研究

崔广心^[8,9]指出用古典力学理论,常规的材料力学试验方法研究深厚冲积层中冻土和冻结壁已不适用。用模拟试验的方法,研究冻结壁厚度与外载、冻结壁温度、掘进半径、段高、段高暴露时间等参数关系,获得深厚冲积中砂层和粘土层的冻结壁厚度计算公式:

粘土层:

$$E = \frac{1.3R_1 P^{1.8} h_d^{0.24} \tau^{0.54}}{u T_p^{3.7}} \quad (11)$$

含水砂层:

$$E = \frac{60R_1 P^{0.76} h_d^{3.7} \tau^{0.34}}{u T_p^{3.7}} \quad (12)$$

式(11)和(12)中, R_1 为井筒掘进半径,m; P 为水平地压(0.1 MPa); h_d 为掘进段高,m; τ 为段高暴露时间,h; u 为冻结壁径向变形量,mm; T_p 为冻土平均温度绝对值,℃。

吴金根^[10]依据我国200多个冻结井实际数据采用数理统计的方法,回归获得冻结壁厚度和冲积层深度之间存在的定量关系(将厚度换算为8m直径相当的冻结厚度),见图4。同时获得冻结壁厚度和深度幂函数回归曲线:

$$E = \alpha a H^\beta \quad (13)$$

式(13)中, α 、 β 是经验常数, $\alpha = 0.04$ 、 $\beta = 0.61$; a 为井筒掘砌半径,m; H 是最大危险断面所处的深度,m。

该公式是我国冻结凿井多年实践的积累,公式简单,使用方便。但是由于数据样本主要是表土层深度300m以内的井筒,并且涉及到掘进段高、冻结

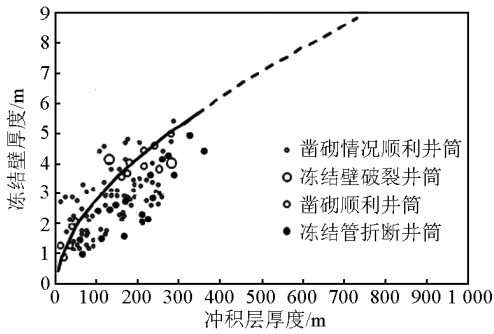


图4 冻结壁厚度和表土层深度统计数据

Fig. 4 Statistical data of deep of alluvium and thick of frozen wall

壁蠕变等因素,该式在冻结深度 300 m 左右具有一定的实用价值,对冻结深度超过 300 m 的井筒,尚需实践数据的进一步检验。

张向东^[11]等利用冻粘土试件的三轴蠕变试验,建立了非线性蠕变方程来描述不同温度下冻粘土的蠕变特性,探讨了塑粘区的扩展规律,最后推导出冻结壁厚度计算公式:

$$E = a \left[0.67 \left(\frac{p_0 - p_a}{\sigma_t} \right) + 0.95 \left(\frac{p_0 - p_a}{\sigma_t} \right)^2 \right] \quad (14)$$

还有学者建议通过井帮温度判断冻结壁厚度,达到控制冻结壁强度、稳定性和两者之间的对应关系。但是,井帮温度并不是冻结壁强度唯一的参考指标。祁东矿副井在通过特厚冻结粘土层时,井帮温度远远高于设计温度,但是冻结壁性状分析表明,冻结壁有效厚度和平均温度十分接近设计值,考虑到冻结壁的实际工作性状,通过适当改变井壁的设计参数和采用短段掘进、快速通过的施工工艺,能够保证井筒的施工安全和冻结壁的稳定性,并节省资金和缩短工期。实测结果表明,冻结壁和底鼓变形值均较小,没有引起外层井壁的破坏和冻结管断裂事故。

3 目前冻结壁厚度计算讨论

一般来说深度小于 100 m 时,将冻结壁视为无限长弹性厚壁圆筒,按照 Lamé 公式计算;当深度在 200 m 左右时,将冻结壁视为无限长弹塑性厚壁圆筒,按 Domke 公式计算;当深度在 200 m 以上时,将冻结壁视为有限长塑性(或者粘塑性)厚壁圆筒,用里别尔曼和维亚洛夫公式等进行计算。维亚洛夫公式相比较而言对 400 m 以内的冻结壁的厚度计算还是比较合理的,但是冻土的蠕变参数($A(T, \theta)$)对计

算结果的影响程度过大,在模型计算过程中,当 $A(T, \theta)$ 变化 0.01 时,冻结壁厚度相差 2 ~ 3 m,而在冻土蠕变试验中由于各种因素不免将产生一系列的误差。冻土蠕变参数对计算结果的灵敏度如此之高,这样等于加大了冻土蠕变试验的精确度和难度,目前设备和技术还不够完善,因此,该公式还存在进一步优化问题。

理论分析主要考虑冻土深度在 400 m 以内,不能适应 400 ~ 800 m 深度冻结壁的设计与稳定性的要求,随着冻结深度的加大,地压增大,上述简单地引用弹性理论或弹塑性理论并做若干假设所得到的解析解已经不能适应深厚冲积层中冻结壁的计算的需要。

对于深厚表土层来说,假设冻结井筒的冻结壁内直径为 $2a = 12$ m,水平侧压力系数取 0.012,冻土的极限抗压强度为 6 MPa,掘进段高取 2.5 m,安全系数取 1.2,冻土的变形模量取 4 MPa,冻土的强化系数 m 取 0.35,冻结壁内壁允许最大变形为 50 mm。将上述参数代入各计算公式可分别得出不同冻结深度所对应的冻结壁厚度,见图 5。

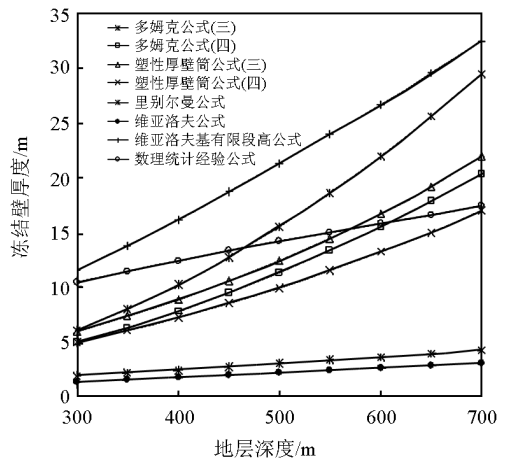


图5 不同计算公式算得的冻结壁厚度

Fig. 5 Thickness of the frozen wall calculating by different formulas

由图 5 可知,采用不同的计算公式得出的冻结壁厚度各不相同,并且差别较大,最大值和最小值几乎相差 10 倍,并且随着冻结深度的增加,这种差别越来越大。这给工程应用带来相当大的困难和风险性。目前,国内外学者正在通过模拟试验、工程实测、数值分析等方法试图解决这一难题。上述理论的解析公式都是建立在冻结壁的平均温度的基础上,即将冻结壁看成均质的,并没有考虑冻结壁沿径

向的非均质性。近几年来,关于冻结壁温度场的非均匀性及其对冻结壁整体强度和稳定性的影响已有系列研究工作^[12~19]。考虑径向非均质条件,井帮的径向变形较均质冻结壁小 25%~30%,可以充分发挥冻结壁的承载和变形性能,有效减小冻结壁的厚度。

4 结语

1) 表征冻结壁强度和稳定性的综合指标是厚度,而反映冻结壁整体性能的综合指标是减小冻结壁的变形。控制冻结壁厚度是减小冻结壁变形的重要手段。

2) 冻结壁厚度设计计算随着对于冻结法凿井工程认识的深入不断发展,Lame 公式适用于表土深度小于 100 m;Domke 公式则可应用于 200 m 范围表土层;超过 200 m 用里别尔曼和维亚洛夫公式等进行计算。维亚洛夫公式相比较对 400 m 以内的冻结壁的厚度计算还是比较合理的。

3) 目前冻结壁设计主要存在以下问题:a. 冻结壁外载多采用永久压力,而实际冻结壁受到的是冻结压力,且冻结压力在冻结法凿井的全过程中是不断变化,因此需要分不同阶段进行冻结壁安全和稳定性评价;b. 为了进行计算对冻结壁进行了一些简化不符合实际甚至会造成较大误差,例如:均质假设(冻结壁平均温度)忽略了冻结壁温度场非均匀性的影响;无限长厚壁圆筒假设明显不符合冻结凿井实际工况。

4) 深厚表土层冻结壁的形成过程是一个复杂的水、热、力多场耦合问题,需要考虑到深部土、冻土与浅部的区别。

参考文献

[1] 崔广心. 论深厚表土层中确定地下结构物外载的基础理论——深土力学[J]. 煤炭学报,1994,24(2):123-126.
[2] 胡向东. 卸荷状态下冻结壁外载的确定[J]. 同济大学学报,2002,30(1):6-10.

[3] 孙家学,刘 斌. 冻结壁原始冻胀力的分析与计算方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),1995,16(3):243-247.
[4] 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,1989,3(11):20-33.
[5] 陈远坤. 深厚冲积层井筒冻结压力实测及分析[J]. 建井技术,2006,27(2):19-21.
[6] 李运来,汪仁和,姚兆明. 深厚表土层冻结法凿井井壁冻结压力特征分析[J]. 煤炭工程,2006(10):35-37.
[7] Lamé,Clapeyron. Memoire sur L'equilibre interieur des corps solides homogenes[J]. Mem divers savans,1833:4.
[8] 崔广心,卢清国. 冻结壁厚度和变形规律的模拟试验研究[J]. 煤炭学报,1992,17(3):37-47.
[9] 崔广心. 深厚冲积层中冻结壁厚度的研究[J]. 冰川冻土,1995,17(增刊):26-34.
[10] 吴金根. 对冻结壁厚度计算公式的探讨[J]. 江苏煤炭,1987(3):39-42.
[11] 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.
[12] 钟贵荣,周国庆,王建州,等. 深厚表土层非均质厚冻结壁粘弹性分析[J]. 煤炭学报,2010,35(3):397-401.
[13] 王建州. 深厚表土层非均质厚冻结壁力学特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2008.
[14] 赵晓东,周国庆,徐志伟. 深土地压及对冻结壁厚度的影响[J]. 岩土工程技术,2008,22(6):281-285.
[15] 赵晓东,周国庆,李生生. 不同温度梯度冻结深部粘土偏应力演变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(8):1646-1651.
[16] 周国庆,赵晓东,李生生. 不同温度梯度两种应力路径冻结中砂应力—应变特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(3):338-343.
[17] 赵晓东,周国庆,李生生. 不同温度梯度冻结中砂加卸载变形研究[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(2):158-162.
[18] 赵晓东,周国庆,陈国舟. 不同温度梯度冻结粘土破坏形态及抗压强度分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(12):1854-1860.
[19] 胡 坤,周国庆,荆留杰,等. 深厚表土多圈管冻结温度场演变规律研究[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(2):150-153.

(下转 101 页)