

深冻结壁时空设计理论*

Time-space design theory for deep ice wall of short cylinder

陈湘生

(煤炭科学研究总院北京建井研究所, 100013)

文 摘 关系到冻结法成败的冻结壁设计理论和公式, 经历了由弹性、弹塑性到流变体假设过程, 相对应, 经历了无限长厚壁圆筒静态理论、动态理论和有限长厚壁圆筒准动态理论。事实证明无限长厚壁圆筒静态理论(包括弹性体、弹塑体和流变体)不符合实际情况, 是深冻结井中事故发生的主要原因之一。而有限长厚壁圆筒准动态理论虽比较符合实际情况, 但其中温度和时间因素没有分离而作为作为一个变量在公式中, 也没考虑冻结管变形因素。本文以我国近 20 年冻结施工及冻土力学研究成果为基础, 提出了以冻结壁(冻结管)变形极限为准则的各变量分离的深冻结壁时空设计理论及公式, 它有别于传统的设计理论及观念, 其合理性在实践中被证实。

关键词 冻结壁, 时空观, 设计理论, 动态观。

中图法分类号 TD 262.1 TU 472.9

作者简介 陈湘生, 男, 1956 年生, 1982 年元月毕业于淮南矿业学院(现淮南工业学院), 1986 年在柏林工业大学进修岩石力学, 1991 年至 1994 年在英国剑桥大学作为 B-Fellow 师从 A. N. Schofield 教授从事寒区工程离心模型试验研究。研究员, 博士生导师, 煤炭科学研究总院北京建井研究所所长、地下工程特殊施工技术研究中心主任。兼任国际地层冻结学术大会组委会委员(代表中国), 中国煤炭学会理事, 中国岩土工程研究中心技术委员会副主任, 上海地铁建设指挥部技术委员会委员等职。

Chen Xiangsheng

(Beijing Res. Inst. of Mine Construction, China Coal Res. Inst., Beijing, 100013)

Abstract Hypothesis of ice wall design theories and formulas, which determine success of artificially ground freezing, have been based on elastic, elastoplastic to rheologic bodies successively, and change from a long, thick, lined or unlined cylinder approach in static or kinetic state to a short, thick, unlined cylinder approach in quasikinetic state correspondingly. Many accidents have occurred in deep ice walls because these methods except the last one are not satisfy for the conditions of ice wall. Even though the short, thick, unlined cylinder approach in quasikinetic state matches most of conditions of ice wall, it takes two important variables (time and temperature) into account inseparately in one parameter without consideration of freeze tube deformation. This paper, on the basis of recent 20 years' research results, presents a time-space concept and a design method for a short, thick, unlined deep ice wall with consideration of freeze tube deformation. All variables including time and temperature are considered separately in the new formula and can be easily controlled in different ways for safety, and efficiency and economy. This time-space concept has changed the traditional ideas and theories in this field.

Key words ice wall, time-space concept, design theory, kinetic concept.

1 前 言

自从 1880 年德国工程师 P. H. Poetsch 提出人工地层冻结法(Artificially ground freezing method)原理并应用到凿井工程中以来已有 110 多年的历史。我国 1955 年首次应用该方法开凿开滦林西风井以来也有 40 多年的历史。回顾冻结法在国内外的应用发展史, 冻结深度经历了由浅到深、应用范围由矿山凿井工程发展到其他岩土工程的过程。其中, 作为临时支护结构冻结壁的设计是决定冻结法加固地层成败的关键之一。而深冻结壁(圆形)设计在深表土(第四系)冻结法凿井中更为突出。它也是近 20 年国内外冻结法凿井在深厚粘土层中造成许多重大事故的主要原因之一。冻结粘土强度比冻砂要低许多, 而且比起冻砂来蠕变

特性更显著。还有冻结壁内的冻结管强度问题。但过去的设计理论很少考虑这些关键因素。

2 冻结壁设计理论回顾

在冻结法凿井早期, 因冻结深度较浅, 人们设计圆形冻结壁时, 把冻结壁看成弹性体, 采用 Lamé 和 Clapeyron(1833)^[1]无限长厚壁圆筒设计公式

$$R = r \sqrt{\frac{[S]}{[S] - 2P}} \quad (1)$$

式中 R 为冻结壁外半径; r 为冻结壁内半径; $[S]$ 为冻土单轴抗压许用应力; P 为计算地层中的水平地压

* 1997 年煤炭工业部科技进步一等奖和二等奖部分理论内容。
到稿日期: 1997-09-05。

值。

对于较深冻结井, 公式(1)已不适应。德国的 Domke 教授(1915)^[2]把冻结壁看成弹塑性体, 提出了无限长厚壁圆筒的弹塑性设计公式

$$R = r \left| 0.29 \left| \frac{P}{S_t} \right| + 2.3 \left| \frac{P}{S_t} \right|^2 + 1 \right| \quad (2)$$

式中 S_t 为冻土长时强度。

随着冻结深度的进一步增加, 冻结壁出现了不少事故。人们对冻结壁进行了再认识, 发现上述公式没能考虑冻土具有流变特性这一显著特征, 也即与时间有关这一特征, 是导致这些事故的根本原因之一。根据这一分析, 前苏联土力学专家 Бялб (1962)^[3]提出了小段高冻结壁(有限长厚壁圆筒)设计公式

$$R = r \left| \frac{(1-m)(1-\xi)P}{A'} \left| \frac{h}{U_r} \right|^m \frac{h}{r} + 1 \right|^{\frac{1}{1-m}} \quad (3)$$

式中 U_r 为冻结壁内侧最大径向位移; h 为掘进段高(见图1); m 为冻土强化系数, 它由下式决定:

$$\gamma_c = \left| \frac{\tau_c}{A'} \right|^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

式中 γ_c 为剪应变强度; A' 为与温度 T 和时间 t 有关的试验参数; τ_c 为剪应力强度; ξ 为冻结壁上下端约束系数, 介于 0~0.5 之间。

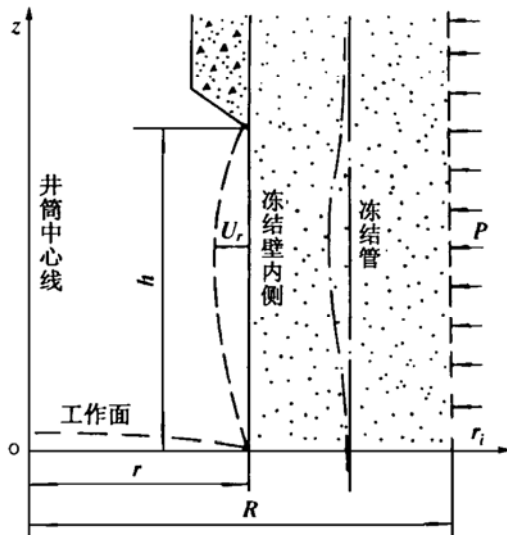


图1 小段高冻结壁设计图

Fig. 1 Sketch of ice wall of short section

在分析了有内支护的冻结壁变形后, 德国 Klein 博士(1980)^[4]得出了无限长(高)冻结壁内侧蠕变位移计算式

$$U_r = \left| \frac{\sqrt{3}}{2} \right|^{B+1} r \left| \frac{(P - P_i) \frac{2}{B}}{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{2}{B}}} \right|^B A t^C \quad (5)$$

式中 U_r 为冻结壁蠕变变形; P_i 为井壁支护对冻结

壁的支反力; 其余参数基于冻土蠕变数学模型

$$\epsilon = A \sigma^B t^C \quad (6)$$

式中 ϵ 为蠕变应变; B 为蠕变应力参数, 比较式(4)式(5), 有 $B = \frac{1}{m}$; C 为蠕变时间参数; A 为与温度相关的蠕变参数。

从以上冻结壁设计理论的发展历史可见, 式(1)和式(2)是基于与时间无关的弹性或弹塑性理论的, 可称之为“静空观”或静态理论; 式(3)已考虑了冻土流变(参数 m, A')和掘砌工艺(参数 ξ , 段高 h 和限定变形值 U_r), 但参数 A' 没能把时间 t 和温度 T 直观表达出来, 可称之为“准时空观”或准动态理论; 在式(5)中把式(3)中参数 A' 分离成 A 和 t^C , 得出了有内支撑(P_i)冻结壁蠕变变形(与时间相关)公式(参数 A, t^C, B), 称之为“时空观”或动态理论。如果令 $P_i = 0$, 成为无限长厚冻结壁流变公式。

从图1可见, 冻结壁强度及稳定性不但与几何参数 R 和 r 有关, 更重要的是与段高 h 、工作面地层约束 ξ 和冻土力学性质相关。而冻结壁的设计主要考虑冻结壁暴露段及其初始和边界条件, 由于在地层深部段高 h 一般小于冻结壁内半径 r , 冻结壁应视为有限长厚壁圆筒 $\left| \frac{R}{r} \geq 1.1 \right|$ 且 $\left| \frac{R-r}{r} \geq \frac{1}{10} \right|$, 且冻土为一

3 深冻结壁时空设计理论及公式

3.1 人工冻土蠕变数学模型

经过近 10 年对我国冻结凿井中 33 个矿井 20 多类人工冻土力学性能的试验研究, 发现式(4)和式(6)可较好地描述我国人工冻土尤其是人工冻结粘土的蠕变特性, 并找出了式(6)中的温度参数 A 的基本规律(轴对称条件下)^[5,6]。

$$\gamma_c = \frac{A_0}{(T + 1)^K} \tau_c^B t^C \quad (7)$$

式中 γ_c 为蠕变剪应变强度; T 为负温的绝对值; τ_c 为蠕变剪应力强度; A_0 , K , B 和 C 全为试验决定的参数。

与式(6)类似, 比较式(7)和式(4), 有 $B = \frac{1}{m}$,

$$\frac{1}{A'} = \frac{A_0^{\frac{1}{B}}}{(T + B)^{\frac{K}{B}}} t^{\frac{C}{B}} \tag{8}$$

表 1 列出了我国典型人工冻土的蠕变参数。图 2 是典型人工冻土蠕变曲线。

表 1 我国典型人工冻结粘土蠕变参数

Table 1 Creep parameters of typical artificially frozen clay in China

矿区	土层深(m)	含水量(%)	A_0 (MPa)	K	B	C	T (℃)
潘集	260	28.9	19.33	2.6	1.88	0.21	- 5~ - 25
永城	309	21.0	8.30	1.9	1.58	0.31	- 5~ - 15
永城	350	17.3	3.31	1.9	3.06	0.39	- 5~ - 15
永城	370	13.3	5.28	2.1	3.06	0.29	- 5~ - 15
谢桥	226	21.6	7.99	2.8	1.42	0.29	- 5~ - 15
谢桥	226	30.0	12.94	2.0	2.58	0.37	- 5~ - 20
济宁	159	24.0	9.85×10^{-2}	—	3.88	0.28	- 10

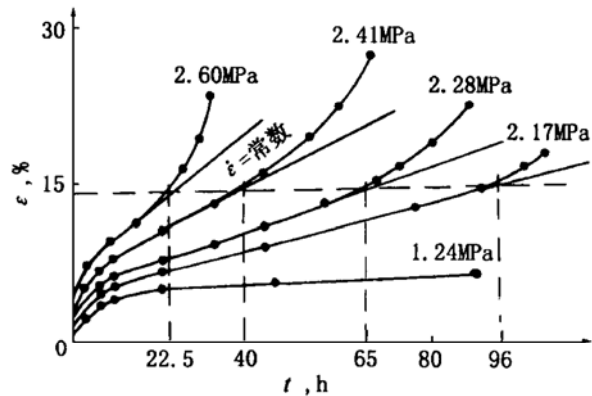


图 2 - 10℃时 JJ214 冻土蠕变曲线簇

Fig. 2 Creep curves of frozen clay JJ214 at - 10℃

3.2 深冻结壁时空设计理论

图 1 所示冻结壁作为设计对象, 其上已浇灌好的混凝土井壁和钢模板, 下部是开挖工作面。在此, 不但要考虑冻结壁的强度, 还必须把其显著特征——蠕变考虑进去, 同时还需考察上下端约束条件、段高。

现将 $\frac{1}{m} = B$ 和式(8)代入 ВЯ ЛДВ 有限段高厚冻结壁设计式(3)得

$$R = r \left| \frac{(1 - \frac{1}{B})(1 - \xi_j P)}{(T + 1)^{\frac{K}{B}}} \right| \left| \frac{h}{U_r} \right|^{\frac{1}{B}} \left| \frac{h}{r A_0^{\frac{1}{B}} t^{\frac{C}{B}}} + 1 \right|^{\frac{R}{B-1}} \tag{9}$$

式中 U_r 为冻结壁内侧最大位移值, 受控于冻结管和冻结壁允许变形值。

上式即成为与时间相关的深冻结壁时空设计公式或称动态设计公式。它同式(3)有根本的区别。首先是时间 t 和温度 T 分离开, 使冻结壁的厚度计算与时

间(蠕变特性)结合起来, 也即与掘砌空帮时间相关——时空观或动态观核心之一。其二, 过去设计冻结壁只取决于强度, 间接反映温度 T , 而这一公式把冻结壁厚度直接同温度联系起来。更重要的是把过去以强度极限为准则的设计变为以冻结壁最大允许变形和冻结管最大允许变形为准则的设计。它克服了过去因只考虑冻土强度但冻结管断裂而造成的淹井事故。它实质也反映了冻土强度, 因为蠕变变形对应着某时刻蠕变应力(图 2)。式(9)的意义还不仅如此。因为深冻结壁多在 250m 以深的第四系地层中, 各种地层的冻土强度不一、蠕变特性不一, 所承受地压 P 值也不同, 如果仍和浅冻结壁一样只以某一最薄弱地层作为设计标志层, 从上到下整个冻结壁都设计得一样厚, 不但造成投资上的极大浪费, 而且还会因冻结壁太厚而延长工期。通过式(9)可以根据不同地层特性, 来改变冻结温度 T 、掘砌时间 t 、段高 h 和冻结管材料(含于 U_r)等或组合调整这些参数来满足冻结壁强度和稳定性的要求, 从而达到优化设计。这是深冻结壁时空设计的时空观或动态观的核心之一。即深冻结壁在空间上也是动态的, 并与时间相关。

以上就是以冻结壁(冻结管)变形极限为准则的深冻结壁时空设计理论或称动态设计理论, 式(9)称之为深冻结壁时空设计公式或动态设计公式。有了式(9), 就可对不同地层中深冻结壁进行优化设计, 达到安全、省时、省投资, 并为岩土及地下工程信息施工和信息设计提供了理论基础。

3.3 举例

现将谢桥矿井 226m 处冻土力学参数及冻结壁几何参数代入上述式(1), (2), (3), (9)进行比较。若取

$[S] = S_t = 5 \text{ MPa}$ ($T = -15^\circ\text{C}$), $h = 2\text{m}$, $r = 4\text{m}$, $t = 24\text{h}$ 。第四系地层水平地压值按下式计算^[7]:

$$P = 0.013H \quad (10)$$

式中 H 为计算地层深度, m; P 为水平地压值, MPa。

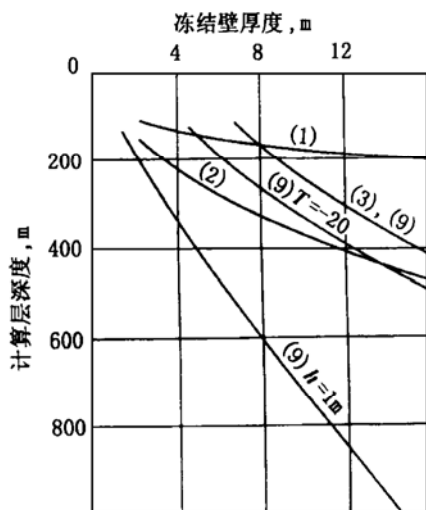


图3 冻结壁厚度公式比较

Fig. 3 Comparison of formulas

所得结果如图3所示。式(1)到200m深度已无法再用。式(2)到400m冻结壁厚达11.5m,费用和工期都非常难以承受。如果按事实上的不是无限长而是有限长厚冻结壁来计算, (3)和(9)式所得比式(2)好。按式(9), 若将段高 h 从2m降到1m时, 深度到600m时, 冻结壁厚8m, 这是可以实现的。式(9)成功地应用于济宁二号矿、三号矿, 并曾用这种“时空观”作了深厚粘土层中冻结壁设计和施工, 取得了良好的经济效益。其中济宁二号矿井把壳牌公司(Shell)设计的冻结壁平均温度 -10°C 提高到 $-7.5^\circ\text{C} \sim -8^\circ\text{C}$, 节省投资数百万元。

4 结 语

深冻结壁时空设计理论反映了深冻结壁实况, 经实践检验是正确的。它不但更新了冻结壁设计的传统理论及观念, 同时为深表土中冻结凿井信息施工奠定了理论基础, 并能产生良好的经济效益。其中工作面约束系数 ξ 的取值, 冻结管允许变形计算等还需进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Lamé, Clapeyron. Memoire sur L'equilibre interieur des corps solides homogens. Mem divers savans, 1833: 4.
- 2 Domke O. Über die Beanspruchung der Frostmauer beim Schachtabteufen nach Gefrierverfahren. Gluckauf, 1915, 51 (47): 1129~1135.
- 3 Вялов С С, Гмошинский В Г, Городецкий С Э, Григорьева В Г, Зарецкий Ю К, Пекарская Н К, Щукина Е П. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты льдогрунтовых ограждений. Изд-во АН СССР, М, 1962.
- 4 Klein J. Die bemessung von gefreirschachten in tonformationen ohne reibung mit berucksichtigung der zeit. Gluckauf-Forschungshefte, 1980, 41: 51~56.
- 5 Chen Xiangsheng. Mechanical characteristics of artificially frozen clays under triaxial stress condition. In: Ground Freezing 88, Vol1. Netherland: A A Balkema, 1988. 173~179.
- 6 Chen Xiangsheng, Su Lifan. General report on mechanical properties of frozen soils[第六届国际地层冻结大会总结报告]. In: Ground Freezing 91, Vol2. Netherland: A A Balkema, 1991. 429~435.
- 7 淮南矿业学院, 山东矿业学院. 建井工程结构, 下册. 北京: 煤炭工业出版社, 1979.