

立井冻结壁 形成规律

〔苏〕И.Д.纳斯诺夫 著
М.Н.苏普利克

陈文豹 伍期建 梁惠生 译
刘万禧 曹祖良 校

煤炭工业出版社

5.3

TD=65.3
2
3

立井冻结壁形成规律

〔苏〕 И. Д. 纳斯诺夫 М. Н. 苏普利克 著

陈文豹 伍期建 梁惠生 译

剑万禧 曹祖良 校

~~煤炭工业出版社~~ 出版社

△ 752040

内 容 提 要

本书介绍了立井冻结法施工时岩石冻结过程的设计和冻结壁的形成；阐述了对冻结壁的基本要求，岩石冻结理论和试验研究的结果分析，冻结壁的设计和计算方法等。书中非常重视热工参数（比热流、管壁温度、热供给系数）的研究和物理模型试验的试验研究方法。

读者对象：从事地下结构物特殊施工和设计的科研及工程技术人员使用，亦可供有关院校师生参考。

И.Д.Насонов М.Н.Шуплик
**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ
ПРИ СООРУЖЕНИИ СТВОЛОВ ШАХТ**
Москва Издательство «Недра» 1976

立井冻结壁形成规律

陈文豹 伍期建 梁惠生 译
釗万禧 曹祖良 校

煤炭工业出版社 出版
(北京安定门外和平北路16号)
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $8^{1/4}$
字数 180 千字 印数 1—1,620
1981年1月第1版 1981年1月第1次印刷
书号15035·2379 定价0.90元

原 序 (节译)

广泛开发埋藏在复杂地质条件下的有用矿床,促进了苏联采掘工业的发展。特别是近些年来开发库尔斯克磁力异常区等的有用矿床时,需要穿过相当厚的松软不稳定含水层。该类地层一般温度较高,矿化度大,有大量渗流的地下水。在这类地层中有70~75%的立井采用冻结法施工。

为了适应冻结法使用范围的不断扩大和复杂的地质条件,需要对制冷系统、热交换过程、冻结设计、冻结壁的形成和维护过程的控制以及施工工艺等进行深入研究。

本书在H.Г.特鲁巴克教授和X.П.哈基莫夫教授等对冻结理论和实践问题论著的基础上,进一步阐述了在复杂地质条件下立井冻结壁形成过程的岩体与冻结器之间的热交换问题,特别是用低温冻结原始温度高的矿山岩石问题;分析了冻结壁温度场的分布规律、比热流变化、热交换过程中的温度梯度以及与冻结有关的参数等,以便合理地利用冷冻设备、降低冻结成本和提高冻结法的可靠性。

基 本 符 号

- x, y, z ——座标;
- l ——冻结管长度, 米;
- S ——冻结管间距, 米;
- d, r_0 ——冻结管内直径、内半径, 米;
- d_{Π} ——供液管外径, 米;
- ξ ——主面上冻结圆柱半径, 米;
- E, E_H, E_B ——冻结壁厚度: 总厚度、冻结管布置圈的外侧和内侧厚度, 米;
- R_B, R_H ——冻结壁的内半径和外半径, 米;
- R_{κ} ——冻结管布置圈半径, 米;
- t_p ——冷媒剂温度, $^{\circ}\text{C}$;
- t_{CT} ——冻结管壁温度, $^{\circ}\text{C}$;
- t_n ——岩石原始温度, $^{\circ}\text{C}$;
- t_0 ——结冰温度, $^{\circ}\text{C}$;
- t_{oc}, t_r, t_s ——轴面, 主面, 界面任意点的温度, $^{\circ}\text{C}$;
- t_{κ} ——轴面与界面交点的温度, $^{\circ}\text{C}$;
- t_1, t_2 ——冻结和未冻结岩石任意点的温度, $^{\circ}\text{C}$;
- t_{cp} ——冻结壁平均温度, $^{\circ}\text{C}$;
- $t_{cp.oc}, t_{cp.r}, t_{cp.s}$ ——轴面、主面和界面的平均温度, $^{\circ}\text{C}$;
- σ ——结冰潜热, 千卡/公斤;
- λ_1, λ_2 ——冻结和未冻结岩石的导热系数, 千卡/(米·小时· $^{\circ}\text{C}$);
- c_1, c_2 ——冻结和未冻结岩石的比热容量, 千卡/(公斤· $^{\circ}\text{C}$);
- c_{r1}, c_{r2} ——冻结和未冻结岩石的容积热容量, 千卡/(米³· $^{\circ}\text{C}$);

α_1, α_2 ——冻结和未冻结岩石的导温系数, 米²/小时;

γ_1, γ_2 ——冻结和未冻结岩石的体积密度, 公斤/米³;

γ ——岩石的密度, 公斤/米³;

ν_p ——冷媒剂的密度, 公斤/米³;

μ ——冷媒剂的动力粘滞系数, 公斤·秒/米²;

ν ——冷媒剂的运动粘滞系数, 米²/秒;

λ ——冷媒剂的导热系数, 千卡/(米·小时·°C);

c ——冷媒剂的热容量, 千卡/(公斤·°C);

q_f ——比热流, 千卡/(米²·小时);

v ——冻结器内冷媒剂的流速, 米/秒;

α ——热转移系数, 千卡/(米²·小时·°C);

P ——作用在冻结壁上的压力, 公斤力/米²;

τ ——冻结延续时间, 小时。

目 录

基本符号

第一章 工程结构物的冻结壁	1
§ 1 对冻结壁的要求	1
§ 2 冻结壁设计的基本原则	5
第二章 岩石冻结时的热交换	54
§ 3 冻结过程的物理实质	54
§ 4 冻结器放热系数	65
§ 5 冷媒剂在冻结器内的流动及放热系数变化规律	76
§ 6 冷媒剂在冻结器内的自身受热	115
§ 7 冻结壁平均温度	121
§ 8 冻结过程中流向冻结器单位热流量	135
§ 9 冻结过程中冻结壁形成特性	144
第三章 冻结岩石热交换过程的研究方法	149
§ 10 矿山岩石冻结过程的研究方法	149
第四章 用物理模拟研究岩石冻结过程	176
§ 11 概述	176
§ 12 物理模拟岩石冻结过程方法的某些特性	177
§ 13 冻结器热的相互作用	184
§ 14 人工冻结岩石过程的研究	194
第五章 试验研究成果	202
§ 15 冻结壁的温度分布和冻土平均温度	202
§ 16 冻结壁的扩展动态	213
§ 17 冻结过程中冻结管外表面的温度	224
§ 18 在冻结壁形成过程中单位热流变化的基本规律	231

§ 19 冻结管的放热系数	244
参考文献	253

第一章 工程结构物的冻结壁

§ 1 对冻结壁的要求

近年来，在采掘工业中，大部分注意力放在开拓东西伯利亚和西西伯利亚、卡查赫斯坦、苏联的中部和西欧部分，中亚西亚、南乌克兰以及其它地区的有用矿床。多数情况是有用矿床的上部覆盖着相当厚的松软不稳定岩层(表 1)，这些岩层的水量丰富、水头高、地下水的原始温度高和地下水

表 1

矿产地或矿区	覆盖岩层的特性			
	厚度 (米)	最大水压头 (米)	井筒预计涌水量 (米³/小时)	水的最高温度 (℃)
莫斯科近郊	150	120	200	8
索哥洛夫斯科	100	60	60	10
列别林斯基	150	100	100	10
萨拉巴依斯科	130	100	100	10
米哈依洛夫斯科	180	140	200	12
斯德依林斯科	190	100	200	10
上一卡姆斯科	300	100	1300	15
彼洛捷洛斯科	350	300	200	24
戈斯奇协夫斯科	450	450	300	20
扎布特斯科	500	350	500	18
顿涅茨奇(西部)	300	60	50	20
开且洛斯科	500	150	200	15
索里哥洛夫斯科	600	120	200	25
亚科夫列斯科	550	550	500	26

矿化的特点。

应当指出，近年来广泛开采钾盐矿，这些矿床覆盖着相当厚的含水岩层，在接近钾盐时含有复杂的天然氯化镁、氯化钠、氯化钙盐水。钾盐矿床地下水的矿化程度变化较大：例如别列兹尼克夫斯基钾盐联合企业地下水的矿化度为178~320克/升。那些高矿化水的结冰温度较淡水低得多，别列兹尼克夫斯基钾盐联合企业矿化水的结冰温度为 $-23\sim -25^{\circ}\text{C}$ 。

矿山地质条件如此复杂的矿床多用于冻结岩石方法施工的立井进行开拓。在这种情况下，冻结壁将起两个基本作用：第一，它起临时支护的作用，承受矿山岩石压力和水压；第二，它应起隔绝地下水从围岩中流入工作场所的作用。从这些前提出发，进行人工冻结岩石结构物的参数计算。应当指出，冻结壁的厚度计算是很复杂的工程问题，因为反映冻结壁特性的参数之间存在着复杂的联系。

冻结壁厚度取决于外部压力大小、冻结岩石的强度特性和变形特性、冻结壁暴露的高度和时间、冻结岩石和井巷的温度状况以及其它因素。冻结壁的平均温度随着厚度的发展而变化，因此冻结壁的强度指标也随着厚度而变化。此外，强度指标主要是随着时间而变化。

岩石的温度状况取决于冻结状况和冻结器内发生的热过程，邻近冻结器的互相影响程度，冻结与未冻结岩石交界面上的相转移。

过程设计的准确度主要取决于下列因素

1. 设计原始资料的可靠性包括：

凿井区域内被穿过的岩石矿物组成和颗粒级配；

被穿过岩石的物理力学特性（平均密度、孔隙率、湿度，

内摩擦角)；

冻结和未冻结岩石的热物理性质，特别是冻结和未冻结岩石的导热系数；

岩石的渗透系数，水力坡度，地下水的流向和流速，每个含水层的水压及其水力联系特性；

地下水的矿化程度和组成，自然矿化溶液的冻结温度。

2. 所用计算方法的可靠性应当正确反映冻结壁在荷载作用下工作的物理本质，并考虑到各种影响因素。

3. 表示冻结岩石流变特性的数据客观性。

4. 冻结壁的形成形状和尺寸与设计的相适应。

最近10年，立井工程采用人工冻结岩石方法的冻结深度急剧增长。假如50年代末最大冻结深度不超过165米(日乌夫斯克-瓦勒恩斯基煤田的(韦利克莫斯托夫斯基矿井)，那么现在别列兹尼克夫斯基钾盐公司在立井施工中的冻结深度已达到362米，而在别罗兹尔斯基铁矿的冻结深度达到425米。在国外的实践中，已知的立井井筒工程采用冻结岩石方法施工的深度达600米和914米(加拿大)。

由于随着深度的增加，作用在冻结壁最深部的岩石压力和水压增大，从而引起出现与冻结岩石蠕变现象有关的塑性变形和矿山岩石原始温度升高，使冻结器内热交换情况复杂化。因此，随着井筒深度的增大，用于冻结岩石的费用急剧增加。

应当指出，冻结方案和冻结状况的许多参数，相互之间有着密切的联系，不仅影响动力指标，而且还影响经济指标。例如，从物理观点看，降低冻结温度将加快冻结岩石的速度，从而缩短冷冻站的运转期。此外，降低冻结温度，还将提高冻结岩石的强度，缩小冻结壁所需要的尺寸。但是从

经济合理性考虑，实际上物理的可能性往往是不合适的。因为降低冷媒剂的温度将成比例地提高冻结器的热流强度。由于压缩机的制冷量随着蒸发温度的降低而减少，为了保证低温条件下的制冷量就应增大冷冻站的能力，也就是说将大大增大冷冻站单位运转时间内的能量消耗和费用。

矿山岩石冻结施工的主要目标是使冻结壁在计算时间内达到设计的尺寸和形状。上述参数在很大程度上取决于冻结孔的打钻质量，最重要的是钻孔的垂直度。因为钻孔偏斜不能保证设计的冻结期，从而提高冻结工程的费用。

在冻结含有高矿化地下水的韦尔赫卡姆斯基钾盐矿床型矿山岩石时，冻结孔偏斜特别危险，该矿化水的结冰温度为 $-23\sim-25^{\circ}\text{C}$ ，在个别情况下还低。在这种情况下，一般相邻冻结器的偏斜可能导致冻结壁不能交圈，或者为了使冻结壁交圈需要降低冷媒剂的温度和大大延长计算的冻结期。例如对比计算表明：冻结孔间距比设计增加一倍，相邻冻结体形成封闭的冻结壁的时间比设计的约延长三倍。如果考虑到积极冻结期内冷冻站的设备每天运转预算费用为3000~5000卢布，那么冻结工程费用明显地提高。

冻结孔打钻结果分析表明，这个问题目前还远未解决。例如采用УРБ-4ПМШ冻结孔钻机钻深超过300米时，钻孔偏斜符合规定^[45]的平均为30%。关于这个问题，最近在别列兹尼克夫斯基钾盐公司（ББК）的冻结孔打钻资料同样得到证实，其中几组资料列于表2^[26]中。从列举的资料明显地看出，总数中46~80%的钻孔偏斜值超过1米，而且冻结孔的彼此偏离（间距）经常达到2.5~3米或更多。所有这些导致在现实条件下多半不存在理想的圆筒，而在立井开挖过程中冻结岩体的形状是不规则的。

表 2

БКК	井筒 编号	冻结孔 深度 (米)	钻 孔 数	不同偏值 (米) 的钻孔数		
				至 0.5	0.5~1.0	1.0
№2	1	308	39	15	6	18
	2	320	42	9	4	29
	3	320	38	12	2	24
№3	1	372	40	10	7	23
	2	375	40	8	—	32
	3	374	40	7	7	26

研究表明了即使在不破坏的情况下, 冻结壁的变形可能大到不允许的数据。当3ЖПК矿区南部井筒施工深度为357~382米时的井帮岩石位移达到80厘米^[45]。显然, 冻结管和冻结壁一起移动。但考虑到井筒无支护段的上端和下端保持不动或在较小的范围内位移, 那么上述位移可能使冻结壁整体性遭到破坏和地下水涌入井筒内。

分析在ВНИОМШСе 发生的 152 根冻结器损坏原因, 说明大部分是由于井筒无支护段冻结壁位移引起的。

根据以上说明可以得出结论: 考虑上述各种影响因素的计算方法, 才可以得到有科学根据的冻结壁厚度。

§ 2 冻结壁设计的基本原则

冻结壁厚度是评定应用冻结法经济合理性的基本参数。冻结壁厚度的过大或过小将导致冻结岩石体积大幅度增加或冻结壁破裂, 甚至地下水的涌出。不论是第一种情况或第二种情况, 都会大大增加地下工程施工的成本和期限。在开发埋藏较深的矿床时, 确定冻结壁厚度的问题具有特别重要的意义, 因为在埋深较大的矿床处冻结 1 米³ 岩体需要消耗较

多的能量。根据选取的冻结壁厚度，进行所有的冻结过程热工和工艺计算。

根据上述因素确定冻结壁厚度是很复杂的问题。所以，鉴于工程特点和原始参数相当离散，最好采用近似方法求解。以下简要地探讨在矿井建设实践中，冻结法的各个发展阶段里所使用的计算方法以及具有一定科学意义的著作。

设计实践中，最广泛采用的是拉麦-哥得林公式和多姆克公式

$$E = R_b \left(\sqrt{\frac{[\sigma_s]}{[\sigma_s] - 2P}} - 1 \right) \quad (I.1)$$

$$E = R_b \left[0.29 \frac{P}{\sigma_s} + 2.3 \left(\frac{P}{\sigma_s} \right)^2 \right] \quad (I.2)$$

式中 $[\sigma_s]$ ——冻结岩石的许用抗压强度， $[\sigma_s] = \frac{\sigma_s}{k_s}$ ；

σ_s ——单轴压缩下冻结岩石的极限强度，公斤/厘米²；

k_s ——安全系数，取3~5。

应当指出，当冻结深度不超过50~70米时，公式(I.1)能够得出满意的结果。随着深度的增加以及岩石压力和水压的增大，公式(I.1)将变为无法应用，因为公式中所含的 $[\sigma_s] - 2P$ 的数值可能变成零甚至是负值，在这种情况下公式将失去物理意义。由此可见，公式(I.1)实际上只适用于下列深度范围：冻结砂子为70米，冻结粘土为40~50米。但是没有考虑在这种深度可能遇到承压水和 $[\sigma_s] - 2P$ 可能等于零或得出负值的情况。

公式(I.1)合理的使用范围应当根据 $[\sigma_s] - 2P$ 的数值不超过某一极限去确定。

根据冻结岩石的实际厚度和冻结岩石的强度分析 $[\sigma_s] - 2P$ 的极限可能变化表明, 如果 $[\sigma_s] - 2P > 4 \sim 6$ 时, 应用公式(I.1)是合理的。

多姆克公式特别考虑了在圣维南塑性条件下, 冻结岩石处于塑性变形发展阶段内工作。但是一些既定假设降低了公式的计算精度和客观性。例如当推导公式时, 冻结壁取无限长, 不考虑冻结壁与周围岩体的结合、内摩擦角及冻结岩石的流变性质。所有这些将造成: 当作用于冻结壁上的压力 $\geq 20 \sim 30$ 公斤/厘米²时, 对深井来说公式(I.2)的结果偏大。也和公式(I.1)一样, 不能推荐用于深井冻结。但是公式(I.2)可以用来确定冻结深度在100米左右的冻结壁厚度。

近十年来提出按极限状态计算冻结壁厚度的方法[8、12、27], 较全面地反映了在外荷载作用下的冻结壁内所发生的物理过程, 并考虑到冻结岩石的流变性质。

科学技术博士 IO. M. 利别尔曼建议按极限平衡理论的极值曲线原理确定冻结壁的尺寸, 认为井筒外壁的岩石坚固到一定外压力作用下变形保持不变。在这种情况下, 壁上个别点很可能处于屈服限度。在塑性变形沿着全部冻结壁厚度发展和冻结壁外表面达到塑性变形带时筒壁失去稳定性。为了解这个问题, 作者在这个建议中作了以下假定:

作用在冻结壁外表面的压力等于未冻结岩柱的全部重量 γH ;

冻结壁裸露段上、下部为刚性固定;

把冻结岩石看作刚-塑性介质, 其极限抗剪强度为极限抗压强度的一半。

由于沿着冻结壁厚度的温度分布是不均匀的, 所以 σ_s 取

平均值。

根据这些假设得出的计算公式形式为：

$$E = h \frac{\gamma H}{\sigma_{scp}} \quad (I.3)$$

式中 γH ——作用在冻结壁外表面上的压力，公斤/厘米²；

h ——掘进段高，米；

σ_{scp} ——在计算时间内沿壁厚的冻结岩石单轴平均抗压强度值，公斤力/厘米²。

显然，公式 (I.3) 考虑到冻结岩石的强度随时间延长而降低的特性。

公式 (I.3) 适用于 $\frac{h}{R_b}$ 的比值小的情况。当 $h > R_b$ 时，即冻结壁可以当作无限高度的圆筒。当冻结壁厚度小于 5.5 米时，Ю. М. 利别尔曼建议采用下列公式：

$$E = R_b \left(e^{\frac{\gamma H}{\sigma_{scp}}} - 1 \right) k_3 \quad (I.4)$$

式中 安全系数 $k_3 = 1.1 \sim 1.2$ 。

在文献〔8〕中推荐的冻结壁计算方法，不仅根据强度条件，而且根据允许变形值。计算方法归结为根据随意增加很小的径向外荷载就会破坏冻结壁极限平衡的情况确定冻结壁的厚度。根据冻结岩石蠕变和极限变形状况以及考虑冻结岩石蠕变的计算，归结为那样的冻结壁厚度，即裸露的冻结壁内表面在径向外荷载作用下最大可能的位移不超过按结构物工艺条件的允许数值。在这种情况下得出两种不同的计算方案——被明确规定过的和工程的；以适应两种不同的井筒掘进（计算的）方案——最大掘进段高和最小掘进段高。

第一种计算方案作为平面问题来解，按极限应力状态计

算时, 建议按下式确定冻结壁的厚度:

$$\frac{R_{\text{B}}}{R_{\text{B}}} = \left\{ 1 + \frac{\left[t_{\text{g}}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - 1 \right] P}{2K_{(\tau)} \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)} \right\}^{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - 1}} \quad (\text{I.5})$$

而按极限变形状态计算时, 根据下式确定冻结壁厚度

$$\frac{R_{\text{B}}}{R_{\text{B}}} \left[1 - \frac{mP}{\bar{A}_{(\tau)} \left(\frac{2\Delta}{R_{\text{B}}} \right)^m} \right]^{\frac{1}{2m}} \quad (\text{I.6})$$

式中 $K_{(\tau)}$ ——在计算时间内冻结岩石的粘结力系数, 公斤/厘米²;

φ ——在计算时间内的内摩擦角, 度;

$\bar{A}_{(\tau)}$, m ——在计算时间内冻结岩石的蠕变特性;

Δ ——冻结壁内壁的允许径向位移, 米。

第二种计算方案 (当井筒短段掘进时) 要探讨与冻结壁端面固定程度有关的两种情况。

按极限应力状态的计算, 建议按下式进行:

a) 当只在裸露的冻结壁与永久支护连接处的冻结壁端部 (沿井帮未冻结岩石掘进的情况) 为牢固固定时,

$$E = R_{\text{H}} - R_{\text{B}} = \sqrt{3} \frac{Ph}{\sigma_{s(\tau)}} \quad (\text{I.7})$$

在这种计算条件下安全系数 k_3 的范围为:

$$1 < k_3 < 1 + \frac{2\sigma_{s(\tau)}}{\sqrt{3}P} \ln \left(1 + \frac{\sqrt{3}Ph}{\sigma_{s(\tau)}R_{\text{B}}} \right) \quad (\text{I.8})$$

b) 两个端面牢固固定时 (开挖的岩石已冻到井筒内部)