

冻结壁系统热力学熵模型(I)*

谷廷全

(兰州大学, 1986年5月29日收到)

摘 要

本文述评了人工冻土研究的热学理论, 指出了其重要意义和不足之处。文中对冻结壁进行了系统分析, 根据物质层次的不同, 将其划分为三个子系统: 冻土分散系统、冻土土质系统和冻结壁系统。它们对应于不同的运动形态。冻结壁系统是一个多方多层次的开放性大系统。冻结壁系统的稳定及其控制问题是人工土冻结技术中的关键问题。利用非平衡热力学和耗散结构理论方法, 作者论述了冻结壁系统的形成及其稳定问题。剖析了它们的热力学本质, 提出了冻结壁系统的热力学熵模型, 其结果令人满意。

一、引 言

冻结法凿井是在德国学者F. H. Poetsch 1880年提出人工冻结原理三年之后被用于特殊凿井工程, 迄今已有百年历史, 是目前国际上在井巷、桥涵、隧道和地铁等工程中使用比较广泛的一种施工技术^[1~2]。以往对冻结壁热学问题的研究主要集中于对冻结壁温度场的求解和交圈时间的确定等^[3~4], 而没有把冻结壁作为一个整体(系统)综合地研究其热学稳定性。也就是说, 没有把冻结壁热学理论研究建立在系统的背景上, 从系统的角度研究其热学稳定性。实际上, 只要简单考察一下整个冻土热学的研究现状, 也就很容易理解人工冻结凿井系统中所出现的这一情况。冻土热学中最有发展前途的将是冻土热力学。

国际上关于冻土热力学的研究也刚刚开始。苏联学者苏卡切夫^[5]最近提出用冻土热力学熵描述冻土的稳定性, 但没有给出定量的表达式, 而只是进行了定性叙述。虽然冻土热力学研究的理论和实际意义是众所周知的, 但是由于其难度较高, 使得进展确很缓慢。因而是现代冻土学研究中最为薄弱和关键的一个环节, 也是目前广为探讨的一个前沿课题。

本文拟采用系统分析的方法, 在建立冻结凿井中的冻结壁系统模型的基础上, 展开其热力学讨论, 建立冻结壁系统热力学熵模型。通过对模型的调控得出人工冻结凿井系统的最优化程序, 为土之人工冻结热设计提供科学依据。

二、冻结壁系统分析

冻土系统观点是冻土学发展的一个新阶段^[6], 也是现代冻土学的一个重要组成部分。冻

* 吴学谋推荐。

土系统思潮的产生和发展使现代冻土学的多学科特征比起传统冻土学有了崭新的意义,尤其是系统科学、数学和热力学方法向冻土学的渗透,将使冻土学的发展产生重大变化。在文献[6]中根据冻土的物质层次划分出冻土分散系统、冻土土质系统、冻土层系统和冻土区域(圈)系统。把这一理论应用于井壁系统可划分出:冻土分散系统、冻土土质系统和冻结壁系统。

冻土土质系统主要是由吸附水、离子、偶极子、冰晶和胶体等组成;冻土土质系统主要由土骨架、未冻水、水汽和冰组成;冻结壁系统是由前述两系统的组分通过相互作用形成的有机整体。冻土分散系统的主要运动形态是胶体一级的运动,而冻结壁系统的主要运动形态为物理-地球运动。物质的运动形态不同,对应于不同的运动过程,单一的运动形态对应于单一的运动过程,综合的运动形态对应于综合的运动过程。例如,冻土土质系统的运动形态为物理力学,因此,它所对应的过程为物理力学过程,而冻结壁系统对应的则是随制冷量等变化的历史演变过程。

冻结壁系统中发生的基本和主要的过程是与环境系统的能量交换,作为能量交换的主要来源就是冻结管中低温盐水的循环。这一基本过程由于输入和输出能量的不断周转导致一系列次生相互联系的现象发生。表现在冻土分散系统上,主要为综合的物理化学过程,包括氧化还原反应、离子交换过程、胶体凝结过程、胶溶和触变过程等;表现在冻土土质系统上主要为热运动、相变化、力学运动和水分子迁移等。对应于综合的物理力学过程,其中包括热量过程、水分迁移过程、相变过程及在荷载、温度、脱(浸)水等条件下的各种力学过程。这一综合过程中的能量和相变过程分别在不同的条件下成为决定性过程。在一定条件下,每一过程都是相对独立的,且由各自内在的特征决定其变化规律。但重要的是各过程之间的相互联系,构成了一个复杂的反馈网络,决定了冻结壁系统整体的特征和规律。反映在冻结壁系统上则主要表现为冻结壁系统内发生的能量传递、交换、转化、周转和积累过程,决定着冻结壁系统内部温湿状况和状态不可逆地变化,由此导致了冻结壁系统稳定性和整体演变趋势的变化。探讨这一变化规律就是本文的中心任务,也正是人工冻结设计和工程实践所必需的。

为方便起见,我们把研究所涉及的变量大致分为输入变量、输出变量和状态变量三种。输入变量是我们研究的冻结壁系统之外的某个系统所给出的,在我们的问题中主要是制冷量,它加在冻结壁系统上并对其变化施加影响;输出变量是我们感兴趣的表示冻结壁系统某种变化的量,或定义为与控制人工土冻结目的直接有关的量,如热容量、变形系统等等;状态变量是表示冻结壁系统内部状态的量,选择状态变量的方法不是唯一的,根据研究问题的不同可以有多种选择方法。在本文的研究中,选择温度、含水量、体积和压力是完备和方便的。

采用上面的三种变量,我们可以把冻结壁系统表示成如图1所示。图中输入端(左端)表示输入变量的集合,输出端(右端)表示输出变量的集合,状态变量的集合包含在冻结壁系统内部,一般不直接出现在冻结壁系统的外部。

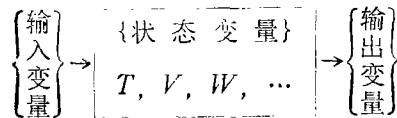


图1 冻结壁系统模式图

三、冻结壁系统形成、发展的热力学本质

有了上述冻结壁系统分析模式之后,我们就可以很方便地应用热力学方法具体讨论冻结壁系统的热力学问题。

从能量观点看,冻结壁系统是用人工制冷的方法使井筒周围岩石层处于冻结状态的地质体系。它是冻结壁系统内部及其与环境之间进行热量水分交换过程中,系统内部能量存在方式和数量分配上的一个特殊阶段,对应于一定的结构形式和功能状态,结构和功能是一矛盾的两个方面,一定的结构是某种功能实现的前提和保证,一定的功能是一定组织水平的反映。它们相互影响相互制约并促进冻结壁系统的不断发展,具体表现在冻结壁系统中就是通过冻结和融化过程来实现它与环境系统之间的熵流交换,通过耗散作用形成自身一定的组织水平,具有一定的力学强度和蠕变特性。

从热力学观点看,冻结壁系统中发生的热力过程都是不可逆的。物理学家Thomson最先考虑用热力学方法处理不可逆过程^[7],热力学第二定律(或熵定律)是物理学中唯一具有时间方向的演进原理。冻结壁系统是以一种大量土颗粒(质点)构成的整体,随着低温盐水的连续循环,冻结壁系统中的能量(热量)不断向外扩散,其内部结构有序化,并且这种有序度不断增大。这样一来,内能的变化和冻结壁系统的内部结构联系起来。

在冻结区的不同部分存在着势差,这即力,即运动之源,必将以扩散方式表现出来,从而出现了水热状况的变化和冻结壁系统内部结构的演变。一方面,水分和热量在运动中扩散,在不断展开其空间形式的过程中,自由能不断转化为熵;另一方面,冻结壁系统又不断分化出适应新的空间形式的新结构,这又使水热分布出现新的位势关系。依次下去,导致冻结壁系统处于不断的变化之中。水热扩散形成冻结壁系统的层次空间。该层次空间的形成和空间结构的多样化,又使以活动为本性的热流(水流)等在不同层次和结构间形成新的梯级位势差,这样推动冻结壁系统内部结构和整体强度的不断变化。联系热流、水流和冻结壁系统内部结构的热力学时间和层次空间之间的关系,在冻结壁系统的变化中表现得非常清晰和完全。

冻结壁系统扩散热量和水分,实际上即为与环境之间的熵流交换,以低温盐水的循环分化和耗散为导试图建立稳定非平衡态。当一层次(圈层)的热量变化(或更确切些说,内能变化)对其邻近层次以动力方式侵入,迫使后者不再能进行原来状态的循环耗散而不遭到破坏,并由此开始重新趋向新的稳定非平衡态。冻结壁系统所进行的上述两种作用演替形成冻结壁系统熵和有序的相互转化关系。在冻结壁系统的变化过程中,随热量和水分的耗散,不断形成和发展对应的层次结构,表现为水热扩散趋向稳定非平衡的熵变过程与冻结壁系统内部结构的有序化相对应。进而在空间层次之间耗散热量和水分,同样达到相互转化、周转和循环等过程。但当某一空间层次的水热状况发生涨落变化,又破坏了层次之间的协同关系,这即公认的“非平衡是有序之源”^[8]。

在冻结壁形成以后它便起着封闭自身的作用,冻结壁系统由此进入相对稳定的阶段。显然,仅地壳自发的水热过程是不可能使冻结壁系统达到这样的冷却状态,低温盐水循环因而成为一种必要的开放形式。随着冻结壁系统的稳定发展,分异度增高,发展依次深入,内稳定性所起的作用相应增强,形成越来越精细和复杂的结构。若仅考虑冻结壁系统的热量过程,根据熵 $s = \text{热量}Q / \text{温度}T$,随着制冷量的不断输入,亦即热量扩散, T 减小。此时, Q 和 T 成线性关系,于是 s 基本保持不变,亦即冻结壁系统结构不变前提下的一种热量过程。但将温度下降到土的冻结温度时,热量虽继续消耗,但 T 则保持恒定而不再下降, s 趋于减少,即等效于系统内增加负熵流,冻结壁系统结构作相应的有序化。但若水份仅原位冻结,在冻结壁系统结构上并不引起急剧明显变化,它基本上服从最小熵产生定律(见后文)。在形成厚层冰夹层时情况则与此不同,当温度梯度达到某一阈值,冻结壁系统内的微观颗粒可获得一致的强力

驱动, 显示宏观尺度的一致运动, 形成结构的高度有序性——厚层冰夹层, 即为耗散结构 (dissipative structure)。这是一种颇为急剧的过程, 热能从此也不再以增加分子之间的相互碰撞而积累, 而是协调一致地实行一种高度合作的传递过程, 这可更多地耗散输入冻结壁系统的热能, 使它的位势处于稳定态。因而可以看出, 冻结壁系统结构有序度的增长是对应于系统和环境之间能量有序性的减弱。此时温度梯度和热流已不再是线性关系, 故应以非线性的流和力之间关系来处理, 即应当采用非线性非平衡态热力学理论。

综上所述, 冻结壁系统形成、发展的热力学本质的基本含义是, 把制冷量 (时间) 和空间结构发展联系起来, 它的形成和发展是不断的层次之间的相互作用, 以及由此形成的不同能级存在形式和不同的熵水平。据此, 描述冻结壁系统热学稳定性的数学模型具有基本的意义。

四、冻结壁系统热力学熵模型

人工土冻结热设计的关键问题之一就是其稳定性的实验与定量研究。我们知道, 过程是状态连续更替的链条。因此, 这一问题研究的第一步就集中在冻结壁系统状态的确定和描述上, 即状态变量的选择问题。根据热力学观点, 在不考虑外场影响的条件下, 选择压力、体积、含水量和温度作为状态变量是完整和方便的。而且本文研究热学稳定性, 不考虑压力变化的影响, 体积参量隐含方程的解中。因此, 实际上的状态变量是含水量和温度。

现在我们用非平衡态热力学理论展开我们的讨论。假定冻结壁系统处在接近平衡的线性非平衡区域, 为了应用严格的热力学方法来描述冻结壁系的行为, 当然首先必须写出它的热力学函数。我们知道, 热力学函数只对平衡态、准平衡态才有意义, 而我们研究的是冻结壁系统的非平衡过程, 为了引进非平衡态的热力学函数, 我们先作一个重要的假设——冻结壁系统的局部平衡假设。这个假设的基本思想就是, 冻结壁系统作为一个整体是非平衡的, 但它可看作由无限多的局域平衡的子系统构成。这些局域子系统满足宏观足够小, 使得用一个均匀的参量能够描述; 微观充分大, 可包容足够的微小颗粒, 使得统计处理能够进行, 对单个粒子而言, 这些局域子系统仍然可看作一个宏观系统。但众多局域之间的任意两个局域的平衡情况可能是不一样的。这一思想与极限和微积分的思想相一致。由于每一局域是平衡的, 因此可定义经典热力学函数, 并用经典热力学函数公式去描述它。对于熵这样的广延量, 冻结壁系统的熵可用局域熵的算术和 (若把局域分得无限多, 就可用积分代替求和) 来描述, 对于含水量 W 也可用同样的方法处理。

忽略气相, 把水分分为两类: 未冻水和冰, 则总水量可表示为:

$$W = W_i + W_u \quad (4.1)$$

其中: W_i ——含冰量; W_u ——未冻水含量。

未冻水量的变化率为:

$$\frac{d}{dt} \iiint_V W_u dV = \iiint_V \frac{\partial W_u}{\partial t} dV \quad (4.2)$$

这里的积分区域遍及整个冻结壁系统。显然, 该变化率等于通过冻结壁系统表面 Ω 流入冻结壁系统内的未冻水流与系统内由于相变产生的未冻水量之和, 即:

$$\iiint_V \frac{\partial W_u}{\partial t} dV = - \iint_{\Omega} W_u \vec{V} \cdot d\vec{\Omega} + \iiint_V \left(- \frac{\partial W_i}{\partial t} \right) dV \quad (4.3)$$

这里 \vec{V}_u 为未冻水的流速。利用Gauss定理将上式化为微分形式我们得到:

$$\frac{\partial W_u}{\partial t} = -\text{div}(W_u V_u) - \frac{\partial W_t}{\partial t} \quad (4.4)$$

该方程具有守恒方程的形式, 左边所表示的局域变化率等于未冻水流的负梯度和表示产生未冻水的源项之和。

我们转而进行对熵的讨论, 设冻结壁系统单位体积的熵为 s_v , 我们可以写出类似的守恒方程:

$$\frac{\partial s_v}{\partial t} = -\text{div}J_{s_v} + \sigma_v \quad (4.5)$$

写成积分形式, 有:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V s_v \cdot dV = -\iiint_V \text{div}J_{s_v} dV + \iiint_V \sigma_v dV \\ &= -\iint_{\Omega} \sum \vec{n} \cdot J_{s_v} d\Omega + \iiint_V \sigma_v dV = \frac{d_{es}}{dt} = \frac{d_{ts}}{dt} \end{aligned}$$

即

$$\frac{ds}{dt} = \frac{d_{es}}{dt} + \frac{d_{ts}}{dt} \quad (4.6)$$

其中, $\frac{d_{es}}{dt} = \text{总熵流} = -\iint_{\Omega} \sum \vec{n} \cdot J_{s_v} d\Omega \quad (4.7)$

$$\frac{d_{ts}}{dt} = \text{总熵产生} = \iiint_V \sigma_v \cdot dV \quad (4.8)$$

上面各式的物理意义就是, 冻结壁系统随时间的变化率由两项组成: 一项为熵流, 一项为熵产生。

显而易见, 仅给出熵产生和熵流的形式表达式(4.8)和(4.7)是很不够的。因此必须给出它们的具体表达式。冻结壁系统的变化主要包括四种不可逆过程: 水分迁移过程, 热量传导过程, 冻结融化过程和压力过程。设这四种不可逆过程对局域熵产生 σ_v 的贡献分别为 σ_{vw} , σ_{vh} , σ_{vL} 和 $\sigma_{vv'}$, 则:

$$\sigma_v = \sigma_{vw} + \sigma_{vh} + \sigma_{vL} + \sigma_{vv'} \quad (4.9)$$

通过研究, 我们发现:

$$\sigma_{vw} = -\vec{j}_w \cdot \nabla \left(\frac{\mu_w - \mu_i}{T} \right) + \frac{1}{T} \vec{j}_w \cdot \vec{F}_w \quad (4.10)$$

$$\sigma_{vh} = -\vec{q} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \quad (4.11)$$

$$\sigma_{vL} = -\rho_l \frac{\partial \vec{W}_t}{\partial \tau} \cdot \nabla \left(\frac{L}{T} \right) \quad (4.12)$$

$$\sigma_{vv'} = -\frac{1}{T} P : \text{grad}V \quad (4.13)$$

其中: T_0 为计算熵值的参考状态的温度, J_w 为水分迁移流, $\mu_w(\mu_i)$ 为水分(冰)的化学势, F_w 为作用在未冻水上包括外力与系统内长程相互作用, q 为热流, ρ 为容重, L 为相变潜热, P 为压力张量。

将(4.9), (4.10), (4.11), (4.12)和 (4.13) 写成积分形式, 我们得到:

$$\sigma = \iiint_V \sigma_v dV = \iiint_V \sigma_{vw} dV + \iiint_V \sigma_{vh} dV + \iiint_V \sigma_{vL} dV + \iiint_V \sigma_{v'v} dV \quad (4.14)$$

$$\sigma_w = \iiint_V \sigma_{vw} dV = \iiint_V \left[-\vec{j}_w \cdot \nabla \left(\frac{\mu_w}{T} \right) + \frac{1}{T} \vec{F}_w \cdot \vec{j}_w \right] dV \quad (4.15)$$

$$\sigma_h = \iiint_V \sigma_{vh} dV = \iiint_V \vec{q} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) dV \quad (4.16)$$

$$\sigma_L = \iiint_V \sigma_{vL} dV = - \iiint_V \rho_i \frac{\partial \mu_i}{\partial t} \cdot \nabla \left(\frac{L}{T} \right) dV \quad (4.17)$$

$$\sigma_{v'} = \iiint_V \sigma_{v'v} dV = - \iiint_V \frac{1}{T} P : \text{grad} V dV \quad (4.18)$$

通过对熵产生的讨论, 我们不难写出熵流 $d_e s/dt$ 的具体表达式为:

$$\frac{d_e s}{dt} = -\vec{j}_w \cdot \nabla \left[c \frac{(T - T_0)}{T} \right] d\Omega - \vec{q} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) d\Omega + \frac{Q_e}{T_0} \quad (4.19)$$

其中: Q_e 为单位时间内环境系统供给冻结壁系统的总有效制冷量, T_0 为制冷管的有效平均温度。(4.19)式的物理意义是相当清楚的, 第一项是环境与冻结壁系统之间的水分迁移引起的熵流, 第二项为环境与冻结壁系统之间的热相互作用对熵流的贡献, 第三项也属冻结壁系统与环境之间热相互作用引起的熵流, 我们之所以把它单列出来, 理由很明确——它具有特别的重要意义, 它是产生冻结壁系统的基本原因。本文的研究目的正是为了阐明如何调节 Q_e , 使冻结壁系统处于热学稳定状态, 保证冻结凿井工程既完全可靠, 又经济方便。

综上所述, 我们得冻结壁系统热学变化的熵模型(称为模式 I):

$$\frac{ds}{dt} = \frac{d_i s}{dt} + \frac{d_e s}{dt} \quad (4.20)$$

$$\frac{d_i s}{dt} = \sigma = \sigma_w + \sigma_h + \sigma_L + \sigma_{v'} \quad (4.21)$$

$$\frac{d_e s}{dt} = - \iiint_\Omega \vec{j}_w \cdot \nabla \left[c \frac{(T - T_0)}{T} \right] d\Omega - \iiint_\Omega \vec{q} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) d\Omega + \frac{Q_e}{T_0} \quad (4.22)$$

这里的 σ_w , σ_h , σ_L 和 $\sigma_{v'}$ 分别由(4.15)、(4.16)、(4.17)和 (4.18) 确定。

利用模型 I 可以一般性讨论冻结壁系统的热学变化过程。从原理上, 它可以描述冻结壁系统中所发生的综合物理力学过程, 其中包括冻结壁系统温度变化过程、冻结融化过程、水分迁移过程、以及在荷载等条件下发生的力学过程(本文只讨论热学过程, 假定系统处于力学平衡状态)等。这些过程不是平行发展的, 也不是彼此没有联系。利用模型 I 可以定量求出在某一条条件下起主要和控制作用的过程, 我们可以根据 σ_w , σ_h , σ_L 和 $\sigma_{v'}$ 的相对大小做到这一点。另一方面, 这些过程既相对独立又相互联系, 构成了一个复杂的反馈网络系统, 共同决定着冻结壁系统整体的特征和规律。本文正是在这一系统模式的背景上把它们纳入了统一的热力学模型, 将对冻土热学的学科系统化起着重要的推动作用。

我们曾利用安徽省桃园矿付井的现场观测资料对该模型进行了验证, 结果令人满意。(另有专文讨论)

参 考 文 献

- [1] El'chaninov, E. A., et al., Temperature conditions designs for permafrost, *Proceedings of the Third International Conference on Permafrost* (1978), 921—927.
- [2] Jessberger, H., Thermal design of artificial soil freezing systems, *Cold Region Science and Technology*, 3 (1980), 3—27.
- [3] Frivik, P. E. and E. Thorberson, Theory and application of ground freezing in civil engineering, *Proceedings of the Second International Symposium on Ground Freezing* (1980), 556—567.
- [4] Benacina, C. and G. Comini, Application of heat conductivity equation to ground freezing, *Journal of Heat Transfer*, 16 (1975), 581—589.
- [5] Suckuqiff, On the stability of permafrost, *Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost*, USSR special issue (1983), 29—34.
- [6] 曾廷全, 系统方法在冻土学研究中的应用, 自然杂志, 11 (1985), 825—829.
- [7] Thomson, W., Use of physics, *Phy. Papers* (1982), 232.
- [8] Nicolis, G. and I. Prigogine, *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*, John Wiley and Sons (1977).

Thermodynamic Entropy Models of the Frozen-Wall System (I)

Zan Ting-quan
(Lanzhou University, Lanzhou)

Abstract

In this paper, the author describes and comments on the traditional thermal theory on artificial ground freezing, and points out its important significance and shortcomings. The frozen-wall is analysed by system analysis methods. According to matter levels the frozen-wall is divided into three sub-systems: frozen colloid system, frozen soil system and frozen-wall system. They correspond to different characteristics. The frozen-wall system is a large open system with multi-levels and multi-aspects. The problems of stability of the system and its control are the key problems in the techniques of artificial ground freezing. Based on non-equilibrium thermodynamics and dissipative structure theory methods, the author discusses and reveals the problems of the formation and stability of the frozen-wall system and its thermodynamic nature, and proposes the thermodynamic entropy models of the system. The result is a great satisfaction.