

氯化钠的掺入对冻土基本热学性质的影响^①

张立新 陶兆祥 顾同欣

(中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室, 730000)

提 要 应用稳定态的比较法, 测定了不同总含水量、不同土中溶液浓度的冻结兰州砂土、兰州黄土的导热系数, 同时应用量热法测定了土骨架和纯氯化钠在同一负温下的比热, 并据此计算了土的导温系数。结果显示, 在同一负温下各种土质的比热均随含盐量的增加而增大, 兰州砂土的导热系数和导温系数随含盐量的增大而降低, 而兰州黄土的这两个参数随含盐量从零开始增加, 首先增大, 在土中溶液初始浓度约为5%时, 达到最大值, 接着逐渐减小。

关键词 导热系数 导温系数 比热 总含水量 初始浓度

影响冻土热学性质的因素很多, 其中最重要的是土质因素。土质因素中又以矿物骨架成分、结构构造、总含水量、含盐量及其成分为主。在已有的研究工作中, 在含盐量及其成分对冻土热学性质的影响方面资料欠缺, 事实上冻土作为一个相组成处于动态平衡的体系, 水冰含量比值的改变和结构构造的变化都将敏感地作用于冻土的基本热物理性质, 而含盐量及成分是影响冻土中水、冰平衡及结构构造形成与演化的重要因素。本文就此因素对冻土热学性质的影响进行了研究, 通过大量试验, 测定了含氯化钠冻土的热学指标, 总结了其变化规律。我国盐碱土分布相当广泛, 且大多与冻土区分布相重合, 因此了解含盐冻土的热学性质, 对于分析这些地区的地热状况, 认识盐碱化过程中冻融作用的影响, 提出合理治理措施及提高其它热工计算精确度都具有重要意义。

1 热学参数的测定与计算

试验中采用了含氯化钠盐的兰州砂土和兰州黄土样品, 考虑两个可变因素, 总含水量和土中溶液初始百分浓度。

1.1 导热系数的测定

导热系数是采用稳定态的比较法测定的(陶兆祥等, 1983)。该方法对于测定较低温度下样品的导热系数具有独到的可靠性与优越性。

^①本文于1993年6月8日收到, 1994年3月2日改回。

1.2 比热的测定

为了计算含盐冻土的比热, 利用量热法在 $-16\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内测定了烘干的兰州砂土、兰州黄土及 NaCl 晶体的比热。测定结果为, 兰州砂土: $0.706\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; 兰州黄土: $0.752\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; NaCl 晶体: $0.852\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

由于在负温状态下的小温度范围内, 土骨架及氯化钠晶体比热受温度的影响很小, 可以认为其比热不随温度变化而变化, 含盐冻土比热计算中, 以上述值为准。

1.3 冻土热学指标的计算

(1) 比热: 含盐冻土是由土骨架、冰、易溶盐溶液和气体组成的多相细碎介质, 由于气相含量很小, 可忽略不计。试验表明, 冻土的比热具有按各物质成分加权平均的性质(徐学祖等, 1981), 即:

$$C = \frac{C_d + (W_0 - W_u)C_i + W_u C_w + S_s C_s}{1 + W_0 + S_s} \quad (1)$$

式中: C 为冻土的比热 [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$]; W_0 和 W_u 分别为总含水量和未冻水含量, 均以小数计; C_d 、 C_i 、 C_w 、 C_s 分别为土骨架、冰、水、和 NaCl 晶体的比热; S_s 为土的含盐量(g 盐/g 土)。利用已有的未冻水含量资料, 并取 $C_w=2.09\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$, $C_i=4.18\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$, 据式(1)计算了含氯化钠的已冻兰州砂土在 $-21.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及兰州黄土在 $-19.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的比热。

(2) 导温系数: 导温系数是土中某一点在其相邻点温度变化时改变自身温度能力的指标(单位为 m^2/s)。它是影响介质温度场的变化速率, 研究非稳定热传导过程常用的基本指标。导温系数与导热系数及容积热容量之间有下列关系:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_\gamma} \quad (2)$$

利用实测的 λ 及计算得到的 C_γ 值, 计算了相应温度下的导温系数。

2 冻土基本热学性质对氯化钠溶液浓度和含水量的响应

含 NaCl 冻土在忽略气相后存在的三种相态为土骨架、孔隙溶液析出物(在第一相变过程中主要是冰晶体)和未冻溶液。随着外界条件和土质因素的变化, 冻土的相组成也将发生变化, 并因此促成导热系数的改变。这里的外界条件主要是指温度, 土质因素则包括土的粒度成分、土骨架矿物成分、含水量、土中溶液浓度及其溶质的成分等。

2.1 土中溶液初始浓度及总含水量对冻土导热系数的影响

试验证明土中溶液浓度的大小对冻土未冻水含量有影响, 而未冻水含量的变化会明显影响到冻土的导热性能。一般情况下, 未冻水含量增大, 冻土导热系数减小。此外, 土颗粒之间的接触关系及紧密程度也是影响导热性能的一个重要因素。

胶体化学实验证明(Olphen, 1976), 电解质浓度的变化会影响到双电层的厚度。浓度增大, 双电层压缩, 其压缩程度决定于与表面电荷符号相反的离子的浓度和价数。反号离子的浓度和价数越高, 双电层的厚度压缩得越厉害。

据以上分析可以认为, 当土颗粒周围的电解质浓度高时, 双电层受到压缩, 斥力的作用范围减小, 颗粒之间的距离可以变得很小, 颗粒与颗粒之间结合更为紧密, 尤其是在冻土中, 由于冰的析盐作用, 电解质浓度在颗粒周围呈过饱和状态, 使上述现象更为明显。

含 NaCl 的兰州粉土随着土中溶液浓度增大, 颗粒之间的距离趋于变小, 双电层压缩, 公共水化膜变薄, 这种作用使其热传导性能提高, 导热系数增大; 但另一方面, 溶液浓度增高, 未冻水含量近于线性增加, 冰含量相对减少, 这又导致冻土导热性能降低。两方面综合作用的结果, 是在总含水量一定的情况下, 当土中溶液浓度较小时, 前一种作用为主, 浓度较大时, 后一种作用占上风, 导热系数呈减小趋势(图 1)。

对于含 NaCl 的兰州砂土来讲, 由于其粒度较大, 矿物成分也较稳定, 主要以后一种作用为主, 因此导热系数随土中溶液初始浓度增大一直减小(图 2)。

关于总含水量对冻土导热系数的影响可以由式(3)看出。在总含水量对未冻水含量影响分布中曾得到:

$$\begin{aligned} W_u &= GW_0 + H \\ W_i &= (1 - G)W_0 - H \end{aligned} \quad (3)$$

式中: W_i 为冻土中冰含量(%). 由于 G 、 H 是与土质有关的常数, 因此 W_i 与 W_0 也呈线性关系。总含水量增大, 冻土中未冻水含量及冰含量都增大, 而水和冰的导热系数均高于砂土和粉土土骨架, 导致导热系数随总含水量的增大而增大, 这一点

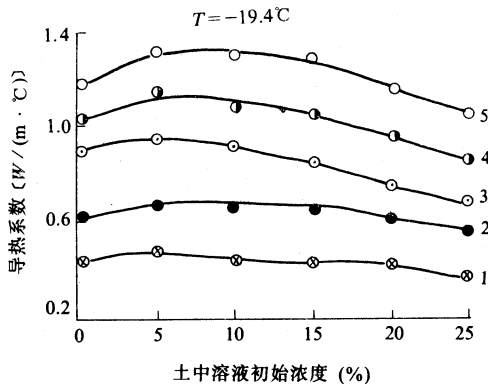


图 1 兰州黄土导热系数与土中溶液初始浓度之间的关系

1. $W_0 = 5.74\%$; 2. $W_0 = 10.55\%$; 3. $W_0 = 15.22\%$;
4. $W_0 = 19.87\%$; 5. $W_0 = 24.28\%$

Fig. 1 Thermal conductivity of Lanzhou loess vs. initial salinity of soil solution

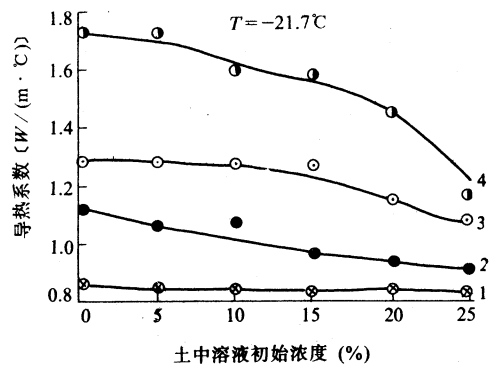


图 2 兰州砂土导热系数与土中溶液初始浓度之间的关系

1. $W_0 = 4.54\%$; 2. $W_0 = 7.25\%$;
3. $W_0 = 9.41\%$; 4. $W_0 = 13.86\%$

Fig. 2 Thermal conductivity of Lanzhou sand vs. initial salinity of soil solution

从图 1, 2 中也可以看出。

2.2 冻土比热与土中溶液初始浓度的关系

冻土比热具有按各物质成分的质量加权平均的性质, 在含氯化钠的冻土中, 当含水量及温度一定时, 含盐量的增加, 将会引起未冻水含量的增大, 相应冰含量减小。由于水的比热大于冰的比热, NaCl 的比热值高达 $0.852 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 高于土骨架比热, 所以综合影响的结果势必造成冻土比热随含盐量增大而增大的现象(图 3, 4)。

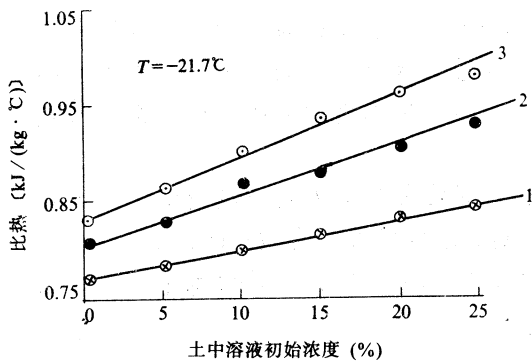


图 3 兰州砂土比热与土中溶液初始浓度之间的关系

- 1. $W_0 = 4.54\%$; 2. $W_0 = 7.25\%$;
- 3. $W_0 = 9.41\%$

Fig. 3 Specific heat of Lanzhou sand vs. initial salinity of soil solution

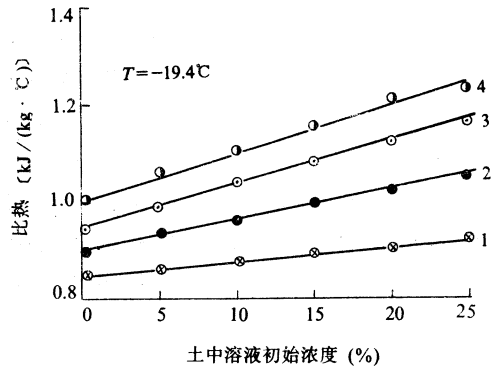


图 4 兰州黄土比热与土中溶液初始浓度之间的关系

- 1. $W_0 = 5.74\%$; 2. $W_0 = 10.55\%$; 3. $W_0 = 15.22\%$;
- 4. $W_0 = 19.87\%$

Fig. 4 Specific heat of Lanzhou loess vs. initial salinity of soil solution

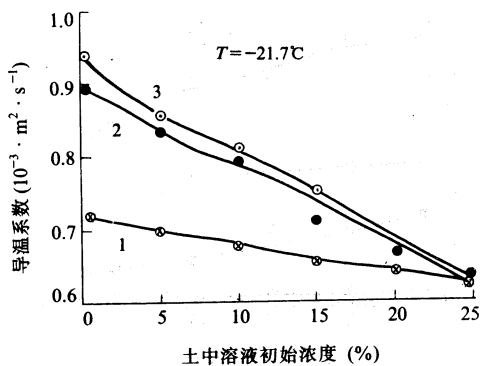


图 5 兰州砂土导温系数与土中溶液初始浓度之间的关系

- 1. $W_0 = 4.54\%$; 2. $W_0 = 7.25\%$;
- 3. $W_0 = 9.41\%$

Fig. 5 Thermal diffusivity of Lanzhou sand vs. initial salinity of soil solution

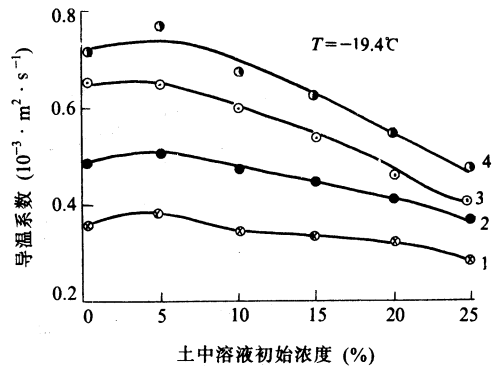


图 6 兰州黄土导温系数与土中溶液初始浓度之间的关系

- 1. $W_0 = 5.74\%$; 2. $W_0 = 10.55\%$;
- 3. $W_0 = 15.22\%$; 4. $W_0 = 19.87\%$

Fig. 6 Thermal diffusivity of Lanzhou loess vs. initial salinity of soil solution

2.3 导温系数与土中溶液初始浓度之间的关系

导温系数与导热系数及容积热容之间的关系可以表示为式(2), 在干容重一定时, 影响导热系数 λ 及比热 C 的所有因素同时也就是影响导温系数 α 的因素, 前面已经分析了 λ 和 C 随土中溶液浓度变化而变化的规律, 导温系数的变化规律就反映了两者的共同作用, 基本规律与导热系数随含盐量的变化规律类似。对于兰州砂土, 随浓度增大导温系数减小; 而对于兰州黄土随浓度的增大, 开始时略有增大, 之后减小(图 5, 6)。

综上所述, 可以得到以下结论:

(1) 含 NaCl 冻土的导热系数受含盐量的控制, 含盐量通过影响冻土结构及其未冻水含量而间接影响冻土的导热系数。对于兰州砂土, 随含盐量增大, 导热系数一直减小; 对于兰州黄土, 含盐量增大, 导热系数略有增大后, 再减小。

(2) 氯化钠的加入, 改变了冻土的组成, 而氯化钠晶体的比热又较高, 因此随着氯化钠含量的增加, 冻土比热也增加。

参 考 文 献

- 徐学祖、陶兆祥、傅素兰, 1981. 典型融冻土的热学性质. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊第2号, 北京: 科学出版社, 55—71
- 陶兆祥、王茂海, 1983. 测定土的导热系数的比较法. 见: 青藏冻土研究论文集, 北京: 科学出版社, 149—156
- Olphen H Van, 1976. 粘土胶体化学导论. 许继权等译, 北京: 农业出版社, 31—40

Study on the General Thermal Parameters of the Frozen NaCl Soil

Zhang Lixin, Tao Zhaoxiang and Gu Tongxin

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, LIGG, CAS, 730000)

Abstract

Using the steady comparing method, we measured the thermal conductivity of the frozen Lanzhou sand and Lanzhou loess with various salt content and water content. We also measured the values of specific heat of the soil grain and pure sodium chloride and calculated the thermal diffusivities. The data show that the specific heat of soils increases with the increasing of salt content. The thermal conductivity and thermal diffusivity of Lanzhou sand go down with the increasing of salt content at the same temperature. For Lanzhou loess however, the two parameters go up at first and then go down with the increasing of salt content, there is a maximum of the parameters corresponding to the concentration about 5% of NaCl solution in soil.

Key words: thermal conductivity, thermal diffusivity, specific heat, salt content