

DI XIA GONG CHENG RE
GONG JI SUAN FANG FA

5649

638053

4434

地下工程热工计算方法

中国建筑科学研究院建筑物理研究所

黄福其 张家猷 谢守穆 王爱仙

中国建筑工业出版社

地下工程热工计算方法

中国建筑科学研究院建筑物理研究所

黄福其 张家猷 谢守穆 王爱仙

中国建筑工业出版社

本书阐述了深埋地下建筑、浅埋地下建筑和地下热力管道的热工计算方法，同时还介绍了现场热工实测方法以及地下工程热湿状况的调查观测结果。

本书所阐述的热工计算方法，是作者根据地下工程的不同使用条件提出的。在既定条件下，作者对所提出的问题力求从理论上和工程实际应用上给以解决。因而，作者应用了大量的实验结果和调查观测材料，对地下工程传热定解问题给以详细的论述，同时按工程实际应用的需要，对每个问题的求解结果，制作了满足使用范围的图表。

本书可供设计地下工程及地下热力管道的科技人员参考，也可供热能、热工、暖通等专业的研究生及大专院校学生参考。

地下工程热工计算方法

中国建筑科学研究院建筑物理研究所

黄福其 张家猷 谢守穆 王爱仙

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

河北省固安县印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：11 字数：268 千字

1981年11月第一版 1981年11月第一次印刷

印数：1—5,400册 定价：1.15元

统一书号：15040·4102

主 要 符 号

- A_0 ——冷冻机效率系数 (千卡/时·°C)；
- a ——导温系数 (米²/时)；
- c ——比热 (千卡/公斤·°C)；
- d ——室内空气含湿量 (克/公斤干空气)；
- d_i ——进风的空气含湿量 (克/公斤干空气)；
- G ——通风量，地下管道内流体的流量 (公斤/时)；
- G' ——地下建筑的空气容量 (公斤)；
- h ——地下热力管道中心至地表面的距离 (米)；
- h_a ——浅埋地下建筑、地下热力管道的覆土厚度 (米)；
- h_0 ——地下建筑的平均高度 (米)；
- L_0 ——地下建筑、地下构筑物横截面的周长 (米)；
- l_0 ——地下建筑的跨度 (米)；
- M_i ——通风湿负荷 (公斤/时)；
- Q ——地下车间在间歇生产情况下的产热量， Q 是时间的函数 (千卡/时)；
- Q_i ——通风热负荷，通风余热，制冷设备的制冷量 (千卡/时)；
- Q_0 ——恒热加热负荷，恒定热源 (千卡/时)；
- q ——热流强度 (千卡/米²·时)；
- Q_{μ} ——地下车间在间歇生产情况下非生产时的产热量 (千卡/时)；
- Q_{γ} ——地下车间在间歇生产情况下生产时的产热量 (千卡/时)；
- r ——径向座标 (米)；
- r_0 ——地下建筑、地下构筑物的内半径 (米)；
- S_0 ——地下建筑、地下构筑物的内表面积 (米²)；
- t ——温度 (°C)；
- t_a ——最热月的地下建筑室内日平均温度 (°C)；
- t_0 ——恒定的温度 (°C)；
- $t_a^{\text{冬}}$ ——冬季地下建筑室内温度 (°C)；
- t_e ——室外年平均气温 (°C)；
- t_i ——进风日平均温度，地下管道入口处的流体温度 (°C)；
- t_{id} ——冬季室外通风计算温度 (°C)；
- t'_{id} ——经过进风室加热的冬季进风计算温度 (°C)；
- t_{im} ——最热月14点的进风温度月平均值 (°C)；
- v ——流速 (米/秒)；
- w ——室内产湿量 (克/时)；

x ——直角座标(米);

y ——直角座标(米);

z ——直角座标(米);

α ——固体表面与其周围流体介质之间的热交换系数(千卡/米²·时·°C);

θ ——角度(度;弧度); 温度周期性波动的波动值(°C);

θ_1 ——地下建筑室内温度年周期性波动的波幅(°C);

θ_{10} ——室外空气温度年周期性波动的波幅(°C);

θ_2 ——地下建筑室内温度日周期性波动的波幅(°C);

θ_{20} ——室外空气温度日周期性波动的波幅(°C);

θ_{21} ——通风地下建筑进风温度日周期性波动的波幅(°C);

θ_s ——地表面温度年周期性波动的波幅(°C);

λ ——导热系数(千卡/米·时·°C);

ρ ——容重(公斤/米³);

τ ——时间(时;日);

φ ——角度(度;弧度); 空气相对湿度(%);

ω_1 ——温度年周期性波动的频率, $\omega_1=0.000717\text{时}^{-1}$;

ω_2 ——温度日周期性波动的频率, $\omega_2=0.262\text{时}^{-1}$;

$Fo=\frac{a\tau}{l^2}$ ——付立叶准数, 其中 l 为物体定型尺寸(米);

$Bc=\frac{2\alpha z}{r_0\rho vc}$ ——准数, 其中 z 为管道的轴向座标, 且流体进入管道的入口处为座标 z 的原点; v 为流体流速, c 为流体比热, ρ 为流体容重, r_0 为管道半径;

$Bi=\frac{\alpha l}{\lambda}$ ——毕渥准数;

$\eta=\frac{\lambda}{\alpha}\sqrt{\frac{\omega_1}{a}}$ (或 $\eta=\frac{\lambda}{\alpha}\sqrt{\frac{\omega_2}{a}}$)——准数;

$\xi=r_0\sqrt{\frac{\omega_1}{a}}$ (或 $\xi=r_0\sqrt{\frac{\omega_2}{a}}$)——准数。

前 言

地下建筑热负荷和热工参数的合理设计,对于保证地下建筑良好的使用功能,尤其是对于保障地下厂房内工人的健康,提高劳动生产率和保证产品质量,关系极其密切;同时,对于降低工程造价和运行管理费用,也有不可忽视的影响。

地下建筑围护结构对其室内温度能发挥较大的调节作用。因此,根据地下建筑传热规律进行热工计算,也是为合理地利用自然能源提供科学依据。

考虑到上述情况,我们根据地下建筑热工实验结果,地下建筑使用效果的调查观测结果,参加地下建筑通风防潮技术改造工作的收获体会,以及理论研究的结果,编写成《地下工程热工计算方法》这本书。

全书分为六章。第一章介绍热传导的基本定律和微分方程式;第二章介绍地下建筑的热湿特性;第三章、第四章和第五章分别介绍深埋地下建筑、浅埋地下建筑与地下热力管道的传热微分方程式和边值条件以及热工计算方法;第六章介绍热工计算所需要的气象参数和热工实验方法。在本书的附录中列出引用的有关的数学关系式和建立热工计算方法所需要的各种计算数值。

许多工程上的传热问题往往比较复杂,因而要从理论上解决这类传热问题,对有关的传热微分方程式和定解条件进行合理的简化是必要的。这种简化的实际依据,就是通过实验和调查观测所掌握的地下建筑的传热规律性和热湿特性。

深埋地下建筑的热传导微分方程式经过简化,可变为二维非稳定热传导微分方程式。经过简化的方程式及其所满足的各种不同条件,便是所要求解的各种不同定解问题。对深埋地下建筑,我们主要是采用解析方法对各种传热定解问题求解,因而便直接得出了有关参数的各种解析关系式。

浅埋地下建筑和浅埋地下热力管道属于二维或三维非稳定传热问题,而且边值条件又较复杂,因此全部结果是采用数值解的方法求得的,同时通过对数值解结果的分析 and 归纳,得出了各个参数之间的各种热工计算关系式。

本书第五章所介绍的地下热力管道热工计算的有关科研成果,是同石油部输油管道勘察设计研究院科研所共同完成的,该所罗塘湖同志等参加了该课题的研究工作;利用有限单元法对输油管传热问题进行数值求解工作中,中国科学院计算中心黄玉霞同志给了我们具体帮助;在进行地下建筑热湿状况的实验观测和实验数据整理分析工作中,原建筑工程部建筑科学研究院建筑物理研究所建筑热工室的许多同志也参加了部分工作。上述单位和人员在这方面的的工作结果,为本书提供不少宝贵材料,作者在此表示感谢。

本书所介绍的计算方法已为我国地下厂房通风设计和运行管理、编制地下建筑通风设计手册及技术措施等所广泛采用。然而书中所涉及的理论问题和实际应用条件的阐述,难免有缺点和错误,欢迎读者批评指正。

目 录

主要符号

第一章 热传导的基本定律和微分方程式	1
§ 1-1 热传导的基本定律	1
§ 1-2 热传导的微分方程式	2
§ 1-3 边值条件	3
第二章 地下建筑的热湿特性	5
§ 2-1 地下建筑的分类	5
§ 2-2 地下车间的生产情况和通风情况	6
§ 2-3 几何条件对传热过程的影响	8
§ 2-4 通风地下建筑室内的温湿度状况	11
§ 2-5 地面温度年变化对浅埋地下构筑物内部温度的影响	15
§ 2-6 围护结构内表面散湿量的观测结果	16
§ 2-7 几个机加工车间通风热湿负荷的实测结果	20
§ 2-8 小结	24
第三章 深埋地下建筑热工计算方法	26
§ 3-1 热传导微分方程式的简化	26
§ 3-2 应用拉普拉斯变换求解深埋地下建筑热传导问题	27
§ 3-3 地下建筑无通风的烘烤热负荷计算	31
§ 3-4 地下建筑通风换气加热烘烤	35
§ 3-5 恒温地下建筑和地下冷库的负荷计算	41
§ 3-6 通风地下建筑日平均壁面传热量	44
§ 3-7 进风温度日周期性波动对室内温度的影响	54
§ 3-8 间歇生产连续通风的车间温度日周期性波动值	58
§ 3-9 间歇生产间歇通风的车间温度日周期性波动值	61
§ 3-10 通风地下建筑通风量的确定	64
§ 3-11 通风地下建筑室内温湿度的计算	66
§ 3-12 室外空气流经地下隧道过程中的加热和冷却作用	70
§ 3-13 地下管道的预热	74
第四章 浅埋地下建筑热工计算方法	78
§ 4-1 概述	78
§ 4-2 热传导微分方程式和边值条件	79
§ 4-3 热传导微分方程式和边值条件的富兰克尔差分格式	83
§ 4-4 浅埋地下建筑传热规律	85
§ 4-5 传热量、通风量和温湿度的计算	91
§ 4-6 浅埋封闭式地下建筑热工计算	102

第五章 地下热力管道热工计算方法	107
§ 5-1 问题的提出	107
§ 5-2 预热阶段的传热微分方程式和边值条件	109
§ 5-3 预热阶段的传热计算	112
§ 5-4 常输阶段的传热微分方程式和边值条件	121
§ 5-5 常输阶段的热工计算	125
§ 5-6 输油管停输阶段的传热微分方程式和边值条件	132
§ 5-7 停输阶段的油温计算	135
第六章 气象参数和现场实验	150
§ 6-1 气象参数	150
§ 6-2 围护结构内表面散湿量的测定方法	151
§ 6-3 现场热工实验方法	153
附录 I 引用的贝塞尔函数	158
附录 II 引用的拉氏变换定理	160
附录 III 深埋恒温地下建筑的 T_0 值	161
附录 IV 深埋地下建筑温度年周期性波动作用下的传热计算参数 $f(\xi, \eta)$ 值、 $\beta(\xi, \eta)$ 值和 $f(\xi, \xi_r)$ 值	162
附录 V “当量圆柱体地下建筑”的 A 和 B 值	164
附录 VI 气象参数	165
附录 VII 材料热物理系数	168
参考文献	169

第一章 热传导的基本定律和微分方程式

§ 1-1 热传导的基本定律

传热(热迁移、热交换)有三种基本方式,即热传导、热对流和热辐射。这三种传热方式各有特殊规律。热传导存在于固体、液体和气体内,热对流只存在于液体和气体内,热辐射是物体之间以电磁波传播的方式相互交换热能。

温度是表征热传导的基本物理参数。在物体内部,热量总是从物体的高温部位传到低温部位。物体内部的热传导过程取决于温度在物体内的分布,因此研究热传导过程的任务,可以归结为分析温度随时间和空间的变化情况。如果以 τ 表示时间,以 l_1 、 l_2 和 l_3 表示空间坐标,那么温度 t 随时间和空间变化,可用如下函数关系式表示:

$$t=t(l_1, l_2, l_3, \tau) \quad (1-1)$$

式中, l_1 、 l_2 和 l_3 表示空间坐标。为了区别不同坐标系,直角坐标系用 x 、 y 、 z 表示,球体坐标系用 r 、 θ 、 φ 表示,其中 r 为球体的径向坐标, θ 为矢径 r 在直角坐标的平面(xoy)上的投影与 x 轴之间的夹角, φ 为矢径 r 与 z 轴之间的夹角;圆柱体坐标系用 r 、 θ 、 z 表示,其中 r 为圆柱体的径向坐标, θ 为矢径 r 与 x 轴之间的夹角, z 轴在圆柱体的轴心上。

在分析温度在物体内的分布时,需要确定物体内部的温度场、等温面、等温线。所谓温度场,是指在空间中一切点的瞬间的温度值的总体;把场内具有相同温度的点连成一个面,就得到等温面。任一平面同等温面相交便得到等温线。

场的温度随时间和空间坐标变化的,称为非稳定温度场。在非稳定温度场内的热传导过程属于非稳定热传导过程。场的温度不随时间变化的,称为稳定温度场,在这种场内的热传导过程属于稳定热传导过程。

在研究热传导过程时,还需要引入热量、热流强度、温度梯度等物理量。热量是指在时间 $\Delta\tau$ 内传过有限面积 ΔS 的热流的数量。热量和温度都是标量。热流强度(或称热流密度)是指在单位时间内传过单位等温面的热流的矢量,因此要指出它的数量 and 方向。温度梯度是表示在等温面法线方向在单位长度上的温度增加量,它也是矢量,具有数量 and 方向。

根据传热学原理,热传导的基本定律可用数学表达式描述,即在单位时间内传过单位等温面的热量 q 等于:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-2)$$

这个定律称为付立叶定律。

式(1-2)等号右边的负号表示热量 q 向温度降低方向传导。式中 λ 称为物体材料热传导系数,或简称导热系数, n 表示等温面法线。如 q 的单位用千卡/米²·时, t 用°C,

n 用米, 则 λ 的单位为千卡/米·时·°C, $\frac{\partial t}{\partial n}$ 是温度 t 在等温面法线上的一阶导数。

当采用矢量表示时, 热流强度的矢量 $\vec{q}$ 等于:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad} t = -\lambda \nabla t = -\lambda \vec{n}_0 \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-3)$$

式(1-3)等号右边项取负号, 是因为矢量 $\vec{q}$ 与矢量 $\text{grad} t$ 同在等温面法线上, 但两者方向相反。

从式(1-2)和式(1-3)可知, 热流强度的矢量 $\vec{q}$ 在数量上等于热量 q , 等温面法线 n 方向的温度梯度 $\text{grad} t$ 的数量等于温度 t 在法线 n 上的一阶导数 $\frac{\partial t}{\partial n}$ 它的矢量等于 $\vec{n}_0 \frac{\partial t}{\partial n}$, 矢量 $\vec{n}_0$ 是 n 方向的单位矢量, 其数值等于 1。矢量 $\vec{q}$ 在指定的任意方向 $\vec{l}$ 的分量等于:

$$q_l = -\lambda \vec{l}_0 \frac{\partial t}{\partial l} \quad (1-4)$$

式中 $\vec{l}_0$ 是在 $\vec{l}$ 方向的单位长度矢量。

§ 1-2 热传导的微分方程式

热传导微分方程式是根据付立叶定律和能量守恒定律导出的, 它是描写物体内部的热传导过程以及温度随时间和空间的变化关系的一个重要的数学物理模型。在均质固体内部热传导的一般微分方程式可表示如下:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \nabla t) + \sum_k I_k \quad (1-5)$$

式中 c 为物体的比热 (千卡/公斤·°C), ρ 为物体的容重 (公斤/米³), I_k 为存在于物体内部的 k 组分的内热源, $\text{div}(\lambda \nabla t)$ 表示物理量 $(\lambda \nabla t)$ 的散度。

在一般情况下, 比热 c 和导热系数 λ 随温度而变化, 但在研究建筑物和构筑物以及其他固体物质的热传导时, 往往假定 c 和 λ 为常数。在这种假定条件下, 如果所研究的物体内部没有内热源, 方程式(1-5)即可写成

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 t \quad (1-6)$$

或

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t \quad (1-7)$$

式中, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ 称为材料导温系数 (米²/时), 根据其物理意义, 也可称为材料热扩散系数。式(1-6)及式(1-7)中的 ∇^2 为拉普拉斯算子。根据所采用的坐标系, $\nabla^2 t$ 可分别表示如下:

采用直角坐标系 (x, y, z),

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (1-8)$$

采用球体坐标系 (r, ϑ, φ),

$$\nabla^2 t = \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left[(1 - \mu^2) \frac{\partial t}{\partial \mu} \right]$$

$$+\frac{1}{r^2(1-\mu^2)}\frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} \quad (1-9)$$

式中 $\mu^2 = \cos^2 \vartheta$,

采用圆柱体坐标系 (r, ϑ, z) ,

$$\nabla^2 t = \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \vartheta^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (1-10)$$

上述方程式均为二阶线性偏微分方程。当解决工程上的热传导问题时,常常需要把这些方程式变换成为无量纲形式。这种变换方法在许多传热学著作中均有论述,这里不再介绍。

§ 1-3 边 值 条 件

运用数理方法,如果能够求出微分方程式满足某种指定的条件(即定解条件)的解(解析解或数值解),那么就可以求得任意时间在物体内部的温度场。所以给出定解条件是重要的。这些定解条件是几何条件、时间的边值条件和空间的边值条件。时间的边值条件在工程上常常采用过程的初始条件;空间的边值条件是指所研究物体的边界条件;所以边值条件是初始条件和边界条件的总合。

1. 初始条件

初始条件是由物体内部的初始温度所决定。若以 τ 表示所研究的热传导过程进行的时间,那么初始条件由 $\tau = 0$ 时的温度分布决定,即

$$t(l_1, l_2, l_3, \tau) = t(l_1, l_2, l_3, 0) \quad (1-11)$$

在解决许多实际问题中,通常取

$$t(l_1, l_2, l_3, 0) = t_0 = \text{常数} \quad (1-12)$$

2. 边界条件

主要边界条件有下列几种:

(1) 给出物体表面的温度分布 $t_b(\tau)$, 即

$$t_b(\tau) = \begin{cases} t(l_{1b}, l_2, l_3, \tau) \\ t(l_1, l_{2b}, l_3, \tau) \\ t(l_1, l_2, l_{3b}, \tau) \end{cases} \quad (1-13)$$

式中注脚“b”标志物体的表面。这类边界条件的最简单情况是:

$$t_b(\tau) = t_0 = \text{常数} \quad (1-14)$$

(2) 给出物体表面的热流强度 $q_b(\tau)$, 即

$$q_b = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_b \quad (1-15)$$

其中注脚“b”定义同上。这里最简单情况有

$$q_b = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_b = \text{常数} \quad (1-16)$$

(3) 给出物体周围介质(一般为流体介质)的温度和物体表面同周围介质的热交换规律,即

$$\alpha [t_v(\tau) - t_b(\tau)] = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_b \quad (1-17)$$

式中 $t_v(\tau)$ ——物体周围介质的温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

α ——物体表面同周围介质之间的热交换系数 (千卡/米²·时· $^{\circ}\text{C}$)。

(4) 两种物体相互紧密连接的表面条件，即两个互相连接的表面的温度相等，以及热流强度相等。

(5) 在一物体表面上紧贴另一薄层材料，后者的其余表面为(2)类条件。这也是两种物体相互连接的条件。假定前者的导热性差 (如大部分非金属材料 $\lambda < 3$ 千卡/米·时· $^{\circ}\text{C}$)，后者的导热性极大，因而其中的 $\text{grad}t \approx 0$ ，这类条件可近似表示如下：

$$q - C_0 \frac{dt}{d\tau} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-18)$$

式中 $C_0 = \delta c \rho$ ；

δ ， c 和 ρ ——分别为薄层材料的厚度、比热和容重。

还有其它情况，在此不再列举。

第二章 地下建筑的热湿特性

§ 2-1 地下建筑的分类

1. 按用途分, 有生产性建筑、非生产性建筑以及其它使用功能的构筑物等。

生产性建筑如地下工厂或车间, 按工艺要求又分为恒温车间(或厂房)和非恒温车间(或厂房)。恒温车间的温湿度主要由生产工艺的要求而定。非恒温车间对温湿度也有一定要求, 如一般机加工车间, 夏季温度要求不超过 $26\sim 30^{\circ}\text{C}$, 相对湿度不超过 $65\sim 75\%$, 以保证正常的生产条件。

非生产性建筑有仓库、交通运输系统、停车场、指挥部和指挥所、街道、商店、学校以及其他公共建筑等。仓库根据所贮存物品的热湿性能又分为两类, 第一类是贮存物品本身具有吸湿性能并可从周围空气中吸收水分的, 如炸药库、棉花库、粮库、纸张库、档案资料库等。对这类库房, 只要防潮设计合理, 管理得当, 又能进行季节性的通风换气, 库内温湿度是可以达到使用要求的。第二类是贮存物品本身不能吸湿的仓库, 如仪器仪表库、各种金属库、飞机库、军械库等。

仓库对湿度要求较严格。我国有些库房已摸索出一套合理的管理方法和制度, 保证了正常使用条件。但仓库的热质交换问题是一个需要进一步进行研究的较复杂而有意义的课题。

地下交通运输系统是某些国家主要城市的地下建筑的主体。世界上有些大城市的地铁长达一、二百公里。有的城市发展了地下街, 成为地下交通系统的组成部分。地下交通运输道的壁面传热量计算是通风负荷计算中一项十分重要的内容。我国北京地铁和天津地铁在兴建的同时, 进行了地铁热工计算方法的研究。

指挥部和指挥所大多没有明确的通风制度, 从传热规律看, 这是一类比较复杂的问题。

街道、商店、学校以及其他公共建筑一般有一定的采暖通风制度, 而且室内的主要热源是人员、照明设备和暖气设备等。因此这类建筑与通风地下车间具有相同的传热规律。

其它地下构筑物有地下热力管道、防护站、高温炉和烟道的地基基础等, 根据不同使用情况, 对温度有不同要求。地下输油管的油温计算是加热站和加热负荷设计的重要内容。高温炉和烟道的地基基础温度场计算结果, 是结构构造设计的重要依据。

2. 按洞体的形成可分为人工洞和天然洞

人工洞的几何条件比较简单而有规则, 天然洞的几何条件一般比较复杂而无规则, 当研究其传热过程时, 对后者的几何条件需要作某种简化。由于天然洞岩壁散湿量大, 又受裂隙水作用, 因此有的天然洞利用时, 不得不加围护结构。

3.按结构处理分,根据被覆结构型式不同,可分为毛洞、衬砌结构和衬套结构。衬砌结构(见图2-1a)的被覆层紧贴在岩壁上,并且一般做有滤水网沟。衬套结构(见图2-1b)的被覆层与岩壁之间留有空气层。

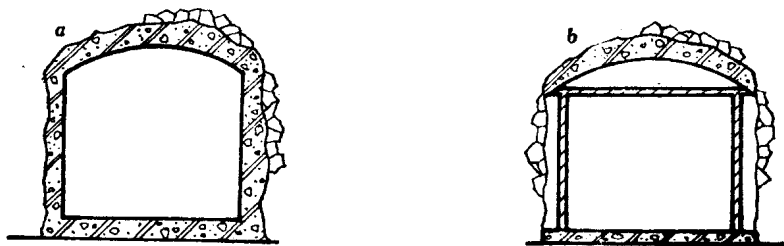


图 2-1 地下建筑围护结构型式示意图

a—贴壁式衬砌; b—离壁式衬套

此外,还有混合结构,即局部衬砌,局部衬套。

衬套结构的优点是能消除洞体裂隙水的作用,同时又具有良好的隔气性能,因而可极大地减少衬套壁面散湿量,而且在一定程度上也减少壁面的传热量。这种结构一般用于恒温车间或仓库。对于余热较大的车间,岩体条件又较好的,为了消除生产过程的产热量,一般采用衬砌结构为宜。

被覆层材料热物理性质一般与基岩(或基层土壤)的不同。因此,当分析传热过程时,考虑被覆层的影响是必要的。

4.按埋深不同,可分为深埋地下建筑和浅埋地下建筑

所谓深埋地下建筑,指的是地面温度及其年周期性变化[●],对洞室内温度状况的影响可以忽略不计的。土壤或岩石的导温系数一般约在 $0.0026 \sim 0.004 \text{ m}^2/\text{时}$ 范围内,地面温度年周期性波动通过深度 $12 \sim 16$ 米的地层厚度,其波幅衰减约 $50 \sim 100$ 倍。因此,一般认为覆盖层厚度大于 12 米的建筑可视为深埋地下建筑。然而,研究结果表明,从地面温度年周期性波动或洞室内温度年周期性波动对地下建筑热工计算结果的实际影响来考虑,覆盖层厚度大于 4 米的,即可视为深埋地下建筑。但在这种情况下,覆盖层厚度对洞室同地表之间年平均温差作用下的传热过程有一定的影响,并与洞室几何条件有关。

考虑到地表面温度对浅埋地下建筑传热过程的影响,这种建筑又分为单建式浅埋地下建筑和复建式浅埋地下建筑。前者在其对应的地面没有其它建筑,后者在其对应的地面有其它建筑。

§ 2-2 地下车间的生产情况和通风情况

地下车间的生产情况和通风情况,对洞室的产热量和温湿度参数以及它们的变化过程有很大影响,因此这是研究地下建筑热工计算方法必须考虑的重要因素。

地下车间的生产情况,是指生产班制和生产工艺布置。地下车间的产热量(包括设备、工件、材料和人员的散热量)随时间变化的过程主要取决于生产班制。三班制连续生

● 温度以年为周期进行周期性变化,简称温度年周期性变化。

产的地下车间产热量可视为恒定不变的。而两班制或一班制生产的车间产热量具有周期性间歇变化的规律。

地下车间生产工艺布置只对产热量分布和温湿度分布有一定影响，如热处理与冷加工分段布置在同一个洞室内就是例证。在这种情况下，一般采用横向机送机排的通风方式，因此热工计算可分段单独进行。

车间设备布置的行数，如单行、双行、三行（多数为双行）等，对地下建筑的传热过程不起决定性影响，因此可不加考虑。

地下建筑的通风情况，主要是通风方式、通风制度和气流组织。

我国在六十年代建成了一批地下厂房，多数采用自然通风方式，或是自然进风机械排风方式，或是机械送风自然排风方式，结果对于工艺比较复杂、有害气体较多的车间，或是洞室较长的车间，存在问题较严重，温湿度条件一般较差。

近年来，通过逐步的通风改造，许多洞室已经开始采用机械送风、机械排风的横向通风方式（如图2-2所示），达到了有组织的就地排除余热和有害气体。当然对洞体长度不

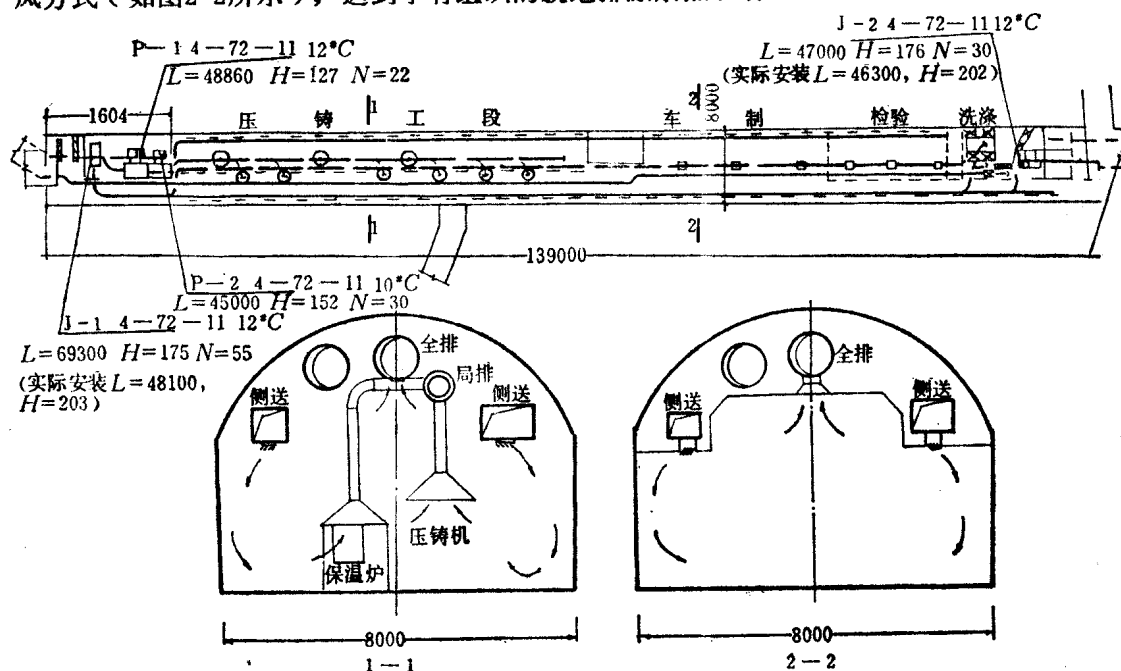


图 2-2 机械送风、机械排风的横向通风方式示意图

大以及工艺又较简单的车间，采用自然进风、机械集中排风的通风方式，一般也能满足温湿度要求（如图2-3所示）。

在有组织的机送机排的通风方式中，目前采用的气流组织型式较多，主要有两侧送中间回，中间送两侧回，中间送中间回（高度较大的车间，送排风管都做在拱顶中部），上侧送上侧回，上送下回，下送上回等。这些不同的气流组织型式对温湿

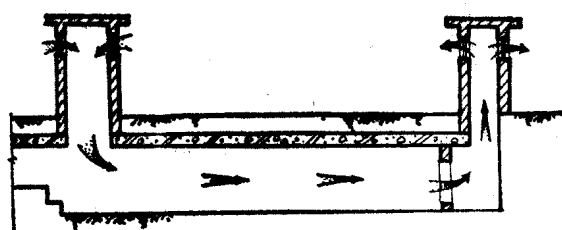


图 2-3 华北某地下机修车间自然进风，机械集中排风的通风方式示意图

度分布虽有某些影响,但由于流程较短,因而在分析地下建筑传热过程时,这种影响可忽略。

地下车间的通风制度主要取决于生产班制。根据生产班制的不同,有周期性间歇生产通风制度、周期性间歇生产连续通风制度和三班连续生产连续通风制度。

周期性间歇生产通风制度包括两种情况。一种是一班制(我国一般为8小时,当地时间8:00~17:30)生产和同时通风,为了叙述方便,可称为一班制生产通风;另一种是两班制(一般为16小时,当地时间6:00~22:00)生产和同时通风,可称为两班制生产通风。我国目前多数车间采用的就是间歇生产通风制度。

周期性间歇生产连续通风制度,是指一班制或两班制间歇生产昼夜连续通风的情况。

§ 2-3 几何条件对传热过程的影响

与地面建筑相比较,地下建筑的一个显著特点,是它的围护结构(被覆结构和基岩或土壤)“无限厚”(深埋)或大部分“无限厚”及局部有限厚(浅埋)。这是构成地下建筑传热过程区别于地面建筑的一个重要条件。因此,地下建筑尤其是浅埋地下建筑的几何条件对传热过程的影响,自然是研究热工计算方法要考虑的重要因素。

基于上述情况,我们对以下三个不同几何条件的地下建筑(和构筑物)传热过程进行了实验观测,即长通道式深埋地下建筑、复建式浅埋地下构筑物(即地面有相应的构筑物)和单建式浅埋地下构筑物(包括地下输油管)。现在分别介绍如下。

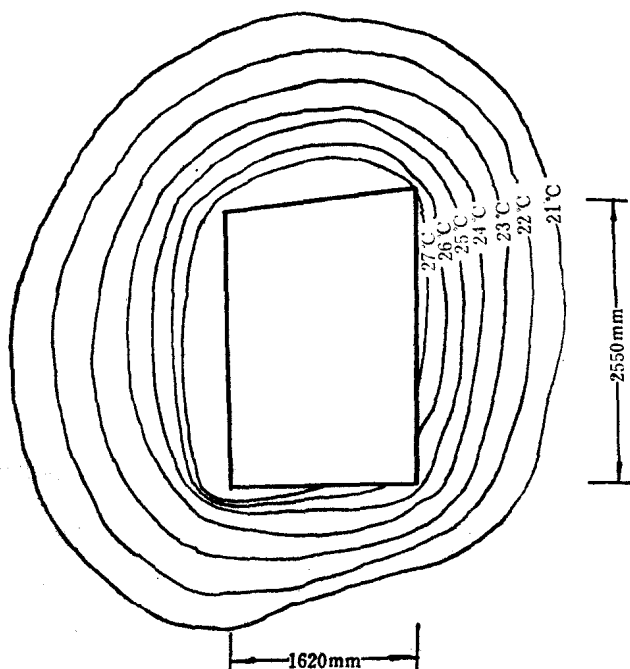


图 2-4 洞室空气温度保持35°C恒温290小时的实验洞横断面等温线分布(初始温度15~16°C)

长通道式深埋地下建筑传热过程的模型实验,是1966年在“西南实验洞”进行的(详细实验方法见第六章)●。洞长13.5米,宽1.62米,高2.55米;围护结构介质导热系数为2.7千卡/米·时·°C,导温系数为0.0047米²/时;围护结构内初始温度分布较均匀(约15~16°C)。共进行了两种热工工况的传热过程实验,即洞内恒温作用下和温度周期性(简谐)波动作用下的传热实验。洞内温度35°C恒温加热实验持续18天。图2-4表示经过290小时恒温加热的洞体围护结构横断面等温线分布实测结果。实验结果表明,围护结构的各等温线近似于同心圆,并且沿洞长度

● 参加实验研究的还有原建工部建研院物理所冯金秋、张春生、白玉珍同志。

(轴向)形成的等温面可近似视为同轴圆柱面。

洞内气温周期性波动作用下的传热过程实验持续约四个温度波动周期,每个周期为10天,共35天。洞内气温波动的波幅为 10°C ,平均气温为 35°C 。在洞内气温周期性波动作用下,洞体围护结构横断面等波幅线(由温度波幅相同点连成)分布的实验观测结果在图2-5示出。

从图2-5看出,洞体横断面上的等温度波幅线形状与洞室横断面的几何形状(长方形)关系不大,并且所有的等波幅线都可近似视为同心圆。

以上实验观测结果表明,长通道式深埋地下建筑的传热过程受洞室几何条件(即洞室横断面形状及其宽高之比例关系)的影响较小,因此它同对称圆柱体的传热过程是相似的。

浅埋地下构筑物传热模拟实验于1963年至1965年在北京西郊进行[●]。该构筑物的尺寸大小取决于热工要求,结构构造型式由使用功能和耐久性决定。构筑物分为工作间和套间(参见图2-6),均做成圆筒型式。

套间围护结构是多层复合的,从内到外为:24砖砌体(顶板为16厘米厚钢筋混凝土),一毡两油防水层,砖砌保护层,2.5米厚土层,24砖砌梅花挡土墙。

工作间是用钢板制成的圆筒,其围护层从内到外为:20厘米厚掺有防水粉的钢筋混凝土,二毡三油防水层,24砖砌墙,回填土及自然土壤。

模型的工作间和套间尺寸为直径2.7米和高度分别为3.2米及2.8米的圆筒。

工作间内安装有几个发热器件,总功率为16800千卡/日(模型的工作间发热量与实际构筑物的相同)。实验研究的目的是观测在恒定热源作用下,工作间的温度变化过程和围护结构(包括土壤)温度分布特点。根据温度分布特点,列出描写传热过程的微分方程式,并对方程式进行求解,得出工作间温度计算方法,为设计构筑物合理的尺寸大小提供依据。

实验过程从1964年7月31日至1965年11月,持续460天,即 $1\frac{1}{4}$ 年。实验结果(工作间温度变化过程在§2-5介绍)在图2-6示出。图2-6a表示年平均等温线分布,图2-6b和图

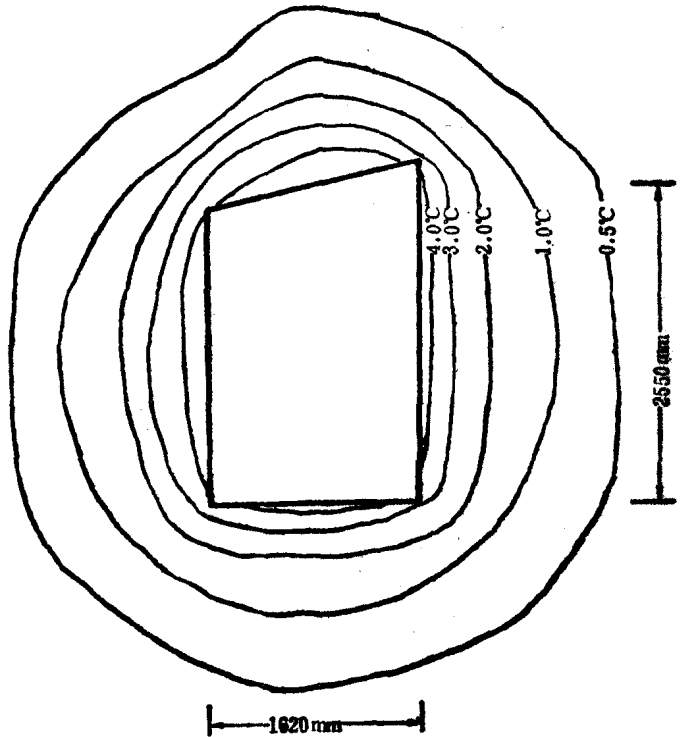


图 2-5 实验洞横断面的等温度波幅线

● 这是地下增音站热工计算方法研究课题的一部分工作,系与邮电部设计院合作进行,原施工部建研院物理所陈德钢、陈寿年同志也参加了该课题的研究工作。