

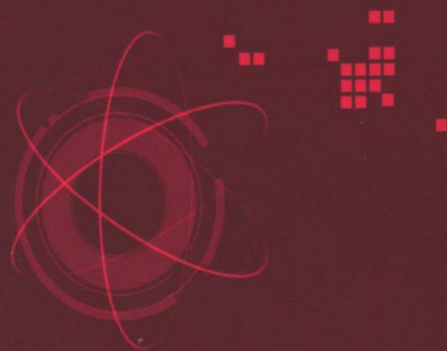
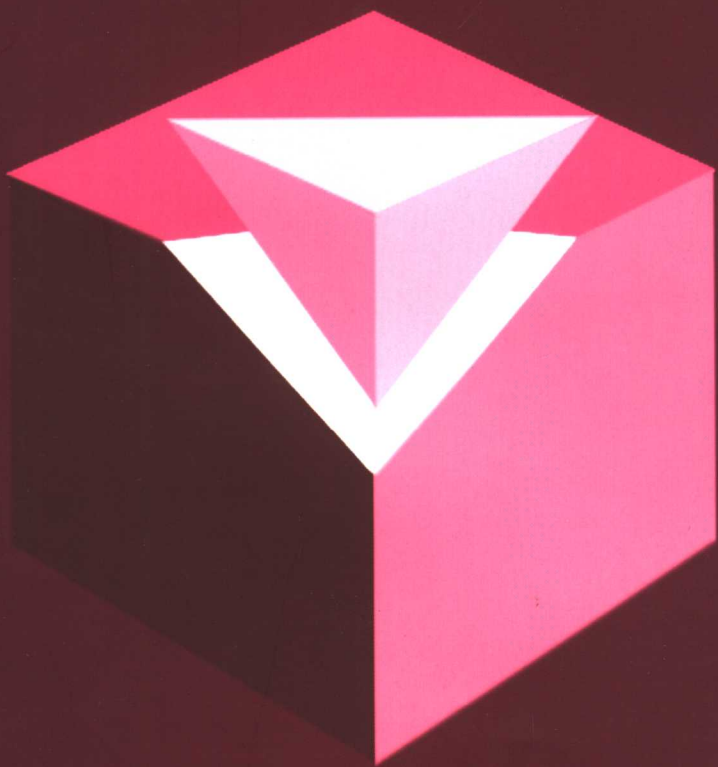


DATIJI HUNNINGTU WENKONG YU FANGLIE

彭立海 阎士勤 张春生 翟建 编著

# 大体积混凝土

## 温控与防裂



DATIJI HUNNINGTU  
WENKONG YU  
FANGLIE



黄河水利出版社

黄河水利委员会治黄著作出版资金资助出版图书

# 大体积混凝土温控与防裂

彭立海 阎士勤 张春生 翟建 编著

黄河水利出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

大体积混凝土温控与防裂/彭立海等编著. — 郑州: 黄河水利出版社, 2005. 11

ISBN 7-80621-891-2

I. 大… II. 彭… III. ①大体积混凝土施工-温度控制  
②大体积混凝土施工-防裂 IV. TU755.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 011205 号

---

出版社: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码: 450003

发行单位: 黄河水利出版社

发行部电话: 0371-66026940

传真: 0371-66022620

E-mail: yrsp@public.zz.ha.cn

承印单位: 黄河水利委员会印刷厂

开本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印张: 14.25

字数: 324 千字

印数: 1—1 500

版次: 2005 年 11 月第 1 版

印次: 2005 年 11 月第 1 次印刷

---

书号: ISBN 7-80621-891-2/TU·53

定价: 30.00 元

# 前 言

大体积或构件较厚的混凝土在施工期受外界与自身温度变化的影响,往往引起各种形式的裂缝,破坏其整体性,危及建筑物的安全,因此大体积或构件较厚的混凝土防裂问题一向受到重视。通过大量的研究与实践,科研人员提出了温度应力的计算方法及大体积混凝土的温控措施,在实际应用中取得了很好的效果。

目前,混凝土结构温度及其应力分析多采用有限元的方法进行计算,已有各类程序可以选用。本书中所介绍的解析计算方法能使读者形成一个温控的完整概念,有助于读者了解温度和应力的变化规律以及各种影响因素的互相关系,便于分析问题及进一步掌握好有限元的各种计算。

温控措施是在混凝土达到规定质量要求的基础上制定的。混凝土质量控制及温控措施的落实是温控成功的前提,因此要特别重视混凝土质量。据统计,为防止裂缝的温控费用约为工程造价的3%,而处理裂缝的费用却达5%~10%,还可能推迟施工进度,因此要特别重视温控措施的落实。

温控设计的主要内容是计算混凝土结构各部位的温度及应力;研究如何降低混凝土温度、降低到什么程度及如何进行表面保护,使之减小温差、降低拉应力。为适应初步涉及温控工作者的需要,书中内容基本上是按温控设计步骤编排的,设计过程中还应加入研究或了解建筑物的地质情况、设计意图、混凝土试验及施工布置、混凝土浇筑方式及进度安排等各项内容,以便考虑选择温控计算的各种数据及计算变化条件并促使温控设计更合理、更经济。书中内容以水利水电工程为主,也包括部分特殊混凝土工程。书中编入了许多工程的有关资料并总结了其温控设计与施工的实践经验以及一些问题的研究成果,并对不常见而又问题较大的课题提出了计算方法或近似的计算方法,希望能对读者今后的工作有所裨益。

在编写过程中,编者对提供工程资料的单位表示感谢,同时对黄委和黄委设计院设计二处的大力支持及一些同志的帮助,表示衷心感谢!

在本书的编写过程中,我们力求内容完善、实用、无误,但由于时间紧迫,再加上水平有限,错误难免,请参阅者注意并指正。

编 者  
2004年2月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 温度控制的基本原理、基本资料</b> .....	(1)
第一节 基本原理 .....	(1)
第二节 基本资料 .....	(3)
<b>第二章 建筑物运用期的温度场分析</b> .....	(28)
第一节 边界温度与基岩计算范围 .....	(28)
第二节 稳定温度场计算 .....	(39)
第三节 构件最低温度 .....	(39)
第四节 半无限体的稳定温度场 .....	(39)
<b>第三章 一般大体积混凝土施工期温度应力分析</b> .....	(41)
第一节 混凝土浇筑温度 .....	(41)
第二节 混凝土温度的徐变应力 .....	(42)
第三节 大体积混凝土基础部位温度应力 .....	(46)
第四节 大体积混凝土上部结构温度应力 .....	(67)
第五节 上、下层混凝土温度应力 .....	(78)
第六节 寒潮及日气温变幅温度应力 .....	(80)
<b>第四章 特殊结构混凝土施工期温度应力分析</b> .....	(86)
第一节 刚架温度应力和电厂下部混凝土应力 .....	(86)
第二节 隧洞衬砌混凝土温度应力 .....	(92)
第三节 碾压混凝土温度应力 .....	(96)
第四节 补偿收缩混凝土温度应力 .....	(101)
第五节 工民建建筑物长大混凝土块温度应力 .....	(109)
第六节 其他特殊部位混凝土温度应力 .....	(114)
<b>第五章 温度控制防裂措施</b> .....	(127)
第一节 温度控制设计的主要内容 .....	(127)
第二节 夏季混凝土浇筑温度控制措施 .....	(128)
第三节 冬季混凝土浇筑温度控制措施 .....	(151)
第四节 冷热容量计算及设备选择 .....	(163)
<b>第六章 混凝土裂缝分析</b> .....	(167)
第一节 混凝土裂缝状况 .....	(167)
第二节 混凝土温度应力的断裂分析 .....	(173)
第三节 混凝土裂缝稳定分析 .....	(179)

第四节 混凝土裂缝的防止措施·····	(197)
第七章 混凝土碳化分析·····	(199)
第八章 工程实例·····	(204)
第一节 小浪底工程混凝土温度控制·····	(204)
第二节 万家寨混凝土重力坝温度控制·····	(212)
第三节 黄河上游混凝土重力坝温度控制·····	(214)
附表 有关计算单位换算表·····	(218)
参考文献·····	(219)

# 第一章 温度控制的基本原理、基本资料

## 第一节 基本原理

由于水泥水化过程中的化学反应产生大量的热量,所以混凝土在浇筑后的温度都有一定程度的升高。随着水化热的逐渐减少及热量的散发,混凝土的温度就会慢慢地降低。水利水电工程中的混凝土大都体积庞大,其温度在浇筑后 3~5 天内呈上升趋势,以后温度逐渐下降,一般经过较长时间才能达到稳定温度。

混凝土在升温过程中体积膨胀,受到基岩(或相邻部位)的约束产生预压应力;降温过程中体积收缩,受到基岩(或相邻部位)约束产生拉应力。但由于早期混凝土弹性模量较小,受到约束后产生的预压应力也较小,后期弹性模量大,受到约束后产生的拉应力也较大,并且远大于早期的预压应力,致使混凝土开裂。温度控制的目的是通过一定的措施,减小混凝土的降温幅度,降低温度应力,确保混凝土的完整性,从而保证工程质量。

混凝土浇筑后的温度变化见图 1-1-1。

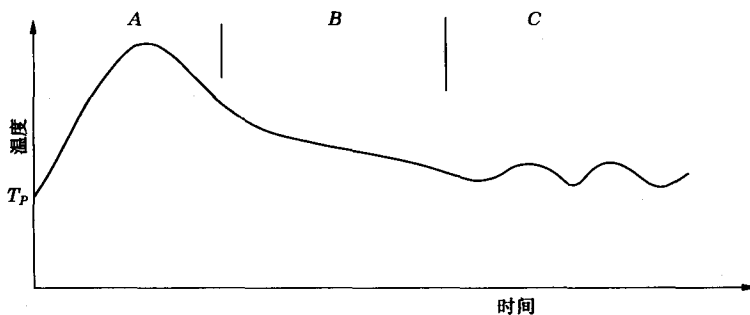


图 1-1-1 混凝土浇筑后的温度变化

从上图中可以看出,混凝土浇筑后,其温度随时间的变化大体可分为 A、B、C 三个阶段。A 为有内热源期,即水化热发生的时段,一般为 1 个月;1 个月后,由于水化热少且延续时间很长,可以忽略不再计算。B 为无热源期,混凝土的温度随着其内部热量的逐渐散发而降低。C 为随气温变化而周期变化阶段,亦即水泥水化热产生的初温已基本消失,大坝内部混凝土的温度保持稳定,外部混凝土随外界温度的变化而变化,也称为准稳定温度场,它是大坝运行期的温度状况,此时的温度作为坝体接缝灌浆的控制温度。对于尺寸小于 10~15m 的构件,则随外界温度的变化而变化,当外界温度最低时达到构件最低温度。

大体积构件的 B 阶段,由于其体积庞大,自然降温时间很长,一般需采用人工方法进行冷却(二期水管冷却),使混凝土的温度在较短时间内达到 C 阶段的准稳定温度,以便

进行接缝灌浆。

## 一、各期温度变化的基本计算式

由于混凝土内部条件及外部条件的不同,各阶段温度变化的基本计算公式也不尽相同。

A 阶段的热传导方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1-1-1)$$

B 阶段的热传导方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1-1-2)$$

C 阶段稳定温度场的热传导方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (1-1-3)$$

式中  $a$ ——导温系数;

$T$ ——混凝土温度;

$\tau$ ——时间;

$\theta$ ——水化热;

$\frac{\partial \theta}{\partial \tau}$ ——水化热的时间变率;

$\frac{\partial T}{\partial \tau}$ ——混凝土温度的时间变率。

计算过程中,稳定温度场一般以外界年平均温度进行计算,准稳定温度场一般以月平均温度进行计算。

## 二、温度计算的边值条件

### (一)初始温度

指水泥水化热发生前的混凝土温度,一般指浇筑温度,有时为计算方便也可假设它为零。

### (二)边界条件

在温度计算中,构筑物的边界共分四类。

(1)第一类边界。混凝土表面温度等于介质温度,一般都是已知温度。如混凝土表面与水接触即可认为是第一类边界。

(2)第二类边界。 $\frac{\partial T}{\partial x_n} = 0$ ,一般为绝热边界,即此边界与介质不发生热传导。如柱状块对称降温的中心处满足 $\frac{\partial T}{\partial x_n} = 0$ ,即为第二类边界。 $x_n$ 为边界法线方向。

(3)第三类边界。一般为混凝土与空气接触,混凝土表面热流密度与其表面温度  $T_n$  和介质温度  $T_a$  之差成正比。



$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x_n} \right) = \beta (T_n - T_a) \quad (1-1-4)$$

式中  $\lambda$ ——混凝土导热系数；  
 $\beta$ ——混凝土表面放热(交换)系数；  
 $T_n$ ——混凝土表面温度；  
 $T_a$ ——介质温度。

式(1-1-4)左边“-”号表示向外散热。

当  $\beta \rightarrow 0$  时为第二类边界； $\beta \rightarrow \infty$  时， $T_n = T_a$ ，即第一类边界； $0 < \beta < \infty$  为第三类边界。 $\beta$  取决于固体表面的粗糙度、流体的黏滞系数及流速，与固体本身材料无关。在温控计算中，一般取  $\beta = 16 \sim 20$ 。 $\beta$  取值见表 1-1-1。

表 1-1-1 混凝土在空气中的  $\beta$  值 (单位: kcal / (m<sup>2</sup> · h · °C))

风速(m/s)	0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
光滑表面	4.41	6.85	8.54	11.80	15.0	18.32	21.53	24.66
粗糙表面	5.03	7.49	9.23	12.66	16.14	19.64	23.10	26.51
风速(m/s)	7.0	8.0	9.0	10.0	1~2	2~3	4~5	
光滑表面	27.72	30.71	33.62	36.47				
粗糙表面	2.83	33.07	36.24	39.44	13.9*	14.7*	17.3*	

注:带“\*”的值为丹江口实测资料。

由于热流经紊流层混合后才等于气温,这之间还有一段距离,此段距离为  $h = \frac{\lambda}{\beta}$ ,  $h$  称为第三类边界的当量混凝土厚度。如将混凝土厚度增加  $h$  作为计算总厚度,可将第三类边界按第一类边界计算。

(4)第四类边界。两种固体相接触的边界为第四类边界。如若两种固体接触良好,温度与热量传递都是相等的,即  $T_1 = T_2$ ,  $\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial x_n} \right) = \lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial x_n} \right)$ 。

如接触不良,则两者温度不等,混凝土热量传递为  $\lambda \left( \frac{\partial T_1}{\partial x_n} \right) = \frac{1}{R} (T_2 - T_1)$ ,  $R$  为热阻,由试验确定; $x_n$  为法线方向。

## 第二节 基本资料

### 一、气象资料

温控设计中气象资料是非常重要的基础资料。一般应选定建筑地点附近的气象水文站资料进行整理分析。需收集的气象资料项目见表 1-2-1。

由于一般河水温和基坑水温资料相对较少,通常根据已建工程实测资料与气温的相

互关系进行推算。国内部分工程水温实测资料见表 1-2-2。

当取得资料的气象站与坝址的高程、自然植被、地形有较大差别时,应与气象部门研究对气象资料进行修正。

表 1-2-1 气象资料表

月 份		1	2	3	...	12	年平均
多年平均气温(℃)							
瞬时最高气温(℃)							
瞬时最低气温(℃)							
冬季日 平均气温	5~-5℃平均天数						
	<-5℃平均天数						
	≤-10℃平均天数						
日变差	多年平均(℃)						
	极端值(℃)						
	>15℃平均天数						
寒潮	多年出现总次数						
	年平均次数						
	1年出现最多次数						
	1天最大降温(℃)						
	2天最大降温(℃)						
	3天最大降温(℃)						
>3天最大降温(℃)							
多年平均太阳辐射热(或云量、或日照时间)							
多年平均河水温(℃)							
多年平均基坑水温(℃)							
多年平均相对湿度(%)							
多年平均蒸发量(mm)							
多年平均风速(m/s)							

## 二、混凝土热学参数

### (一)导温系数 $a$

导温系数反映了混凝土的导热性能,其值主要受骨料用量及其种类的影响,可由试验确定或按  $a = \frac{\lambda}{C\rho}$  计算( $\rho$  为混凝土容重,  $C$  为比热,  $\lambda$  为导热系数)。

### (二)导热系数 $\lambda$

导热系数也是反映混凝土导热性能的一个参数,它的主要影响因素是骨料用量及其本身的热性能。混凝土的温度和骨料含水量也对其有较大影响。

### (三)比热 $C$

水工混凝土的比热变化范围不大,一般在  $0.20 \sim 0.25 \text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$  之间。

表 1-2-2 部分工程水温实测资料表

(单位:℃)

坝名	项目	月份												年平均
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
丹江口	气温	3.0	5.9	10.4	16.1	21.0	26.7	29.8	28.5	22.9	17.0	9.6	4.5	16.3
	河水温	5.6	5.2	11.7	15.5	19.2	25.2	25.1	25.3	22.2	19.6	12.6	7.8	16.3
	基坑水温	13.8	12.7	14.1	14.6	14.7	17.1	22.7	24.1	22.0	19.4	17.5	15.3	17.3
宝珠寺	气温	4.9	7.2	11.8	16.9	20.5	24.4	26.3	25.4	21.1	16.1	11.2	6.7	16.1
	河水温	5.4	7.3	11.6	15.7	17.6	20.1	21.7	21.9	17.9	15.4	10.8	6.9	14.9
乌江渡	气温	5.5	7.3	12.2	17.4	20.4	23.4	26.2	24.9	21.9	16.8	12.4	7.7	16.3
	河水温	9.4	9.8	13.5	16.9	19.6	20.9	22.1	22.4	21.1	18.1	15.1	11.2	16.6
东江	气温	6.1	7.5	12.5	17.7	22.2	25.6	28.6	27.4	23.9	18.0	12.9	7.7	17.5
	河水温	9.6	10.8	14.2	18.1	22.6	24.8	27.8	27.6	25.0	21.1	16.5	11.5	19.6
新安江	气温	5.2	7.9	11.1	16.0	20.9	25.1	28.5	28.8	25.2	18.8	13.1	7.6	17.3
	河水温	7.4	9.0	11.8	17.4	20.7	24.2	29.1	30.0	28.0	21.4	15.3	9.4	18.6

注:宝珠寺上游有碧口水库,两库之间为山间峡谷;乌江渡处于溶洞区。

$\lambda$ 、 $C$  均可通过试验确定或由骨料配比计算得出。

$$\lambda = \frac{\sum \omega_i \lambda_i}{\sum \omega_i}, \quad C = \frac{\sum \omega_i C_i}{\sum \omega_i} \quad (1-2-1)$$

式中  $\omega_i$ 、 $C_i$ 、 $\lambda_i$ ——各类骨料的含量、比热容及导热系数。

故县水库大坝的骨料经过仔细分类,按式(1-2-1)计算的  $\lambda$ 、 $C$  及按  $a = \frac{\lambda}{C\rho}$  计算的  $a$  与试验值较为接近。一些实测资料见表 1-2-3、表 1-2-4。 $a$  对大体积混凝土降温的影响见表 1-2-5。

#### (四)线膨胀系数 $\alpha$

线膨胀系数主要的影响因素是骨料。各类骨料的  $\alpha$  值相差很大。石英、砂岩、花岗岩、玄武岩和石灰岩的  $\alpha$  值依次变小。水泥浆的  $\alpha$  值比骨料的要大,而富混凝土的  $\alpha$  值比贫混凝土的约大 4%。湿养护的混凝土  $\alpha$  值比干燥空气中养护的约小 10%。如有骨料及水泥浆的  $\alpha$  值,依下式可计算混凝土的  $\alpha$  值。

$$\alpha = \frac{\alpha_c E_c V_c + \sum \alpha_g E_g V_g}{E_c V_c + \sum E_g V_g} \quad (1-2-2)$$

式中  $\alpha_c$ 、 $E_c$ 、 $V_c$ ——水泥的线性膨胀系数、弹模、体积(1m<sup>3</sup>混凝土);

$\alpha_g$ 、 $E_g$ 、 $V_g$ ——骨料的线性膨胀系数、弹模、体积(1m<sup>3</sup>混凝土)。

## (五)水泥水化热

### 1. 按水泥矿物成分计算水泥极限水化热

矿物成分完全水化产生的热量如表 1-2-6 所示。

表 1-2-3 混凝土热学性能实例

坝名	骨料主要岩性	$a$ ( $m^2/h$ )	$C$ ( $kcal/(kg \cdot ^\circ C)$ )	$\lambda$ ( $kcal/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$ )	$\alpha$ ( $10^{-5} K^{-1}$ )
丹江口	砂以石英质、卵石以石灰岩为主	0.005 5	0.22	2.77	0.82
乌江渡	人工石灰岩砂岩	0.004 8	0.22	2.56	0.6~0.8
陆水	石灰岩	0.003 5			0.70
刘家峡	石英岩、花岗岩、石英砂岩	0.004 0	0.23	2.25	0.8~0.9
故县	石英岩、安山岩、玄武岩	0.004 8	0.213	2.55	
三门峡	玄武岩、辉绿岩、安山岩、石英岩	0.003 5	0.272	2.37	
胡佛(美)	石英岩、花岗岩	0.004 4	0.225	2.48	0.8~0.95
大苦力(美)	玄武岩	0.002 7	0.231	1.61	0.8
俄马(美)	砂岩	0.004 6	0.232	2.54	1.0~1.1
黄尾(美)	石灰岩、安山岩	0.003 9	0.239	2.26	0.77
夏斯塔(美)	安山岩、板岩	0.003 3	0.233	1.95	0.86

由表 1-2-6 可知,水化热主要来自  $C_3A$  及  $C_3S$ ,为降低水泥水化热产生的温升,水工大体积混凝土用的水泥应限制它们的含量。

### 2. 按经验公式计算

维尔巴克等以 27 种水泥试验其水化热,并用最小二乘法取得多元回归的经验公式。最终水化热  $Q_0$  为

$$Q_0 = a \cdot P_{C_3S} + b \cdot P_{C_2S} + c \cdot P_{C_3A} + d \cdot P_{C_4AF} \quad (1-2-3)$$

式中  $P_{C_3S}$ —— $C_3S$ 的百分含量;

$P_{C_2S}$ —— $C_2S$ 的百分含量;

$P_{C_3A}$ —— $C_3A$ 的百分含量;

$P_{C_4AF}$ —— $P_{C_4AF}$ 的百分含量;

$a, b, c, d$ ——回归系数。

回归系数  $a, b, c, d$  见表 1-2-7。

表 1-2-4 混凝土骨料热学性能

骨料类别	$\lambda$ (kcal/(m·h·°C))				C (kcal/(kg·°C))				$\alpha$ (m <sup>2</sup> /h)	$\alpha$ (10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup> )
	21°C	32°C	43°C	54°C	21°C	32°C	43°C	54°C		
	水	0.516	0.516	0.516	0.516	1.0	1.0	1.0		
普通水泥	1.062	1.097	1.131	1.162	0.109	0.128	0.158	0.197		2.26
石英岩	2.658	2.651	2.640	2.636	0.167	0.178	0.190	0.207		
玄武岩	1.646	1.641	1.638	1.633	0.183	0.181	0.187	0.200	0.003 0	0.95
白云岩	3.710	3.645	3.586	3.424	0.192	0.196	0.204	0.212	0.004 6	1.00
花岗岩	2.509	2.500	2.494	2.479	0.171	0.169	0.175	0.185	0.004 0	0.95
石灰岩	3.470	3.390	3.324	3.262	0.179	0.181	0.187	0.196	0.004 7	0.74
石英岩	4.039	4.007	3.974	3.935	0.165	0.173	0.181	0.189	0.005 4	1.28
流纹岩	1.617	1.627	1.639	1.646	0.183	0.185	0.191	0.193	0.003 3	
长石			2.00			0.194			0.004 1	1.67
大理石			2.11			0.209			0.003 7	0.44
砂岩						0.170			0.004 2	
花岗岩			2.50			0.197			0.005 0	
石英岩						0.220				
石灰岩						0.220			0.005 7	
砂岩							0.210			
玄武岩			2.60			0.266				

基  
岩

表 1-2-5 不同  $a$  值对大体积混凝土降温 90% 所需时间

$a$ (m <sup>2</sup> /h)	混凝土厚度 (m)					
	3	6	15	30	60	120
0.002 5	41d	166d	2.8a	11a	45a	181a
0.003 3	32d	128d	2.2a	9a	35a	141a
0.005 0	22d	89d	1.5a	6a		98a

表 1-2-6 水泥矿物成分水化热表

(单位: kcal/kg)

矿物成分	龄期				备注
	3d	7d	28d	1a	
C <sub>3</sub> A(3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.70	1.88	2.02	2.54	每 1% 矿物的热量 1 年即完全水化
C <sub>3</sub> S(3CaO·SiO <sub>2</sub> )	0.98	1.10	1.14	1.60	
C <sub>4</sub> AF(4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.29	0.60	0.90	1.36	
C <sub>2</sub> S(2CaO·SiO <sub>2</sub> )	0.19	0.18	0.44	0.79	

表 1-2-7 回归系数取值

龄期	3d	7d	28d	91d	1a
$a$	0.58 ± 0.08	0.53 ± 0.11	0.90 ± 0.07	1.04 ± 0.05	1.17 ± 0.07
$b$	0.12 ± 0.05	0.10 ± 0.07	0.25 ± 0.04	0.42 ± 0.03	0.54 ± 0.04
$c$	2.12 ± 0.28	3.72 ± 0.39	3.29 ± 0.23	3.11 ± 0.17	2.79 ± 0.23
$d$	0.69 ± 0.27	1.18 ± 0.37	1.18 ± 0.22	0.98 ± 0.16	0.90 ± 0.22

经验算, 某坝  $Q_0$  值与试验值较接近。

### 3. 水化热试验

一般用蓄热法对水泥做水化热试验。目前只能测试 7d。将 7d 的资料进行整理即可推出  $Q_0$ 。

目前水化热有两种数学表达式:

指数经验式

$$Q_{\tau} = Q_0(1 - e^{-m\tau}) \quad (1-2-4)$$

双曲线经验式

$$\frac{\tau}{Q_{\tau}} = \frac{n}{Q_0} + \frac{\tau}{Q_0} \quad (1-2-5)$$

式中  $m$ ——发热速率, 1/d;

$\tau$ ——龄期, d;

$n$ ——类似  $m$  的试验常数。

式(1-2-5)比较符合试验过程。式(1-2-4)中的  $m$  是一个平均值。虽然成果与试验过程有一定的偏离,但最终结果较为接近。

(1)按式(1-2-5)整理试验资料再计算出  $Q_0(Q_0 = Q_r(n + \tau)/\tau)$ 。以横坐标  $\tau$  绘出  $\frac{\tau}{Q_r} - \tau$  直线图,在竖轴上的截距即为  $\frac{n}{Q_0}$ 。取某一天的  $\frac{\tau}{Q_r}$  及  $\frac{n}{Q_0}$  代入式(1-2-5)计算出  $Q_0$ 。

(2)一元线性回归计算。令  $y = \frac{\tau}{Q_r}$ ,  $A = \frac{n}{Q_0}$ ,  $B = \frac{1}{Q_0}$ , 则式(1-2-5)可改为  $y = A + B\tau$ , 按表 1-2-8 计算。

表 1-2-8 水泥水化热一元线性回归计算

顺序	龄期 $\tau$ (d)	试验值 $Q_r$	$y = \tau/Q_r$	$\tau - \bar{\tau}$	$y - \bar{y}$	$(\tau - \bar{\tau})^2$	$(y - \bar{y})^2$ ( $\times 10^{-4}$ )	$(\tau - \bar{\tau}) \times (y - \bar{y})$	式(1-2-4) 计算的 $Q_r$
1	1	37.65	0.026 6	-3	-0.042 1	9	17.72	0.126	35.85
2	2	46.49	0.043 0	-2	-0.025 7	4	6.60	0.051	48.20
3	3	54.56	0.055 0	-1	-0.013 7	1	1.88	0.014	54.44
4	4	58.29	0.068 6	0	-0.000 1	0	0.01	0	58.22
5	5	60.68	0.082 4	1	0.013 7	1	1.88	0.014	60.74
6	6	62.57	0.095 9	2	0.027 2	4	7.40	0.054	62.55
7	7	64.10	0.109 2	3	0.040 5	9	16.40	0.122	63.91
合计	28		0.480 7			28	51.89	0.381	

可得出:

$$B = \frac{\sum [(\tau - \bar{\tau})(y - \bar{y})]}{\sum (\tau - \bar{\tau})^2} = \frac{0.381}{28} = 0.013 6$$

$$A = \bar{y} - B\bar{\tau} = 0.068 7 - 0.013 6 \times 4 = 0.014 3$$

回归方程为:

$$y = 0.014 3 + 0.013 6\tau \quad (1-2-6)$$

相关系数为:

$$f = \frac{\sum (\tau - \bar{\tau})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (\tau - \bar{\tau})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} = \frac{0.381}{\sqrt{28 \times 51.89 \times 10^{-4}}} \approx 1.0$$

(3)掺有混合料(如粉煤灰)的水泥水化热,不符合式(1-2-5)的直线规律,一般可由经验公式  $Q_0' = Q_0(1 - 0.55P)$  求得( $Q_0$  为纯水泥求得的最终绝热温度),亦可将水化热试验值按  $\tau - Q_r$  在坐标纸画成曲线再配成公式,按回归方程计算  $Q_0'$ 。

例:掺 30% 粉煤灰的水泥水化热试验值于下表

$\tau$ (d)	1	2	3	4	5	6	7
$Q_r$ (kcal/kg)	39.06	47.94	51.31	53.42	55.21	56.52	57.69

取数学表达式  $Q_{\tau} = Ae^{B/\tau}$ 。两边取对数。

$$\ln Q_{\tau} = \ln A + \frac{B}{\tau}$$

令  $y = \ln Q_{\tau}$ ,  $A' = \ln A$ ,  $x = \frac{1}{\tau}$ 。上式改为  $y = A' + Bx$ 。此方程为直线方程,按表 1-2-8 进行回归计算,可求得  $B = -0.44298$ ,  $A' = 4.1007$ ,反求  $A = 60.385$ ,回归方程  $Q_{\tau} = 60.385e^{-0.443/\tau}$ 。按此计算  $Q_{\tau}$  与试验值接近。 $\tau = 30d$  时计算的  $Q_0' = 59.5kcal/kg$ ,按经验公式计算的  $Q_0'$  为  $59.7kcal/kg$ 。

#### 4. 混凝土绝热温升试验

直接试验出某种混凝土配比的  $Q_0'$ ,然后按式(1-2-7)反求水泥的  $Q_0$ 。

$$Q_0' = \frac{WQ_0}{C\rho} \quad (1-2-7)$$

式中  $Q_0'$ ——混凝土的绝热温升;

$W$ ——水泥用量,  $kg/m^3$ ;

$C$ ——比热;

$\rho$ ——容重。

一般情况下,比热  $C$  及容量  $\rho$  均同时做试验,以提高成果精度。

#### 5. 发热速率 $m$ 的计算

求得  $Q_0$  后按式(1-2-8)计算  $m$ 。

$$m = \frac{-\lg(1 - Q_{\tau}/Q_0)}{\lg e \cdot \tau} \quad (1-2-8)$$

此式是由式(1-2-4)移项取对数而成。每一个  $\tau$  值有一个  $m$  值对应。式(1-2-4)的  $m$  是平均值,其值随浇筑温度的不同而发生变化(见表 1-2-9)。

表 1-2-9  $m$  值随浇筑温度的不同而发生的变化情况

$T_p$ (°C)	5	10	15	20	25
$m$ (1/d)	0.295	0.318	0.340	0.362	0.384

混凝土的热学性能均随温度提高而提高(见表 1-2-10)。温控主要发生在夏季,其数据可取自  $25 \sim 30^{\circ}C$ 。

表 1-2-10 水化热随混凝土温度变化情况

(单位:  $kcal/kg$ )

温度	4°C	24°C	32°C	41°C
I	36.9	68.0	73.9	80.0
III	52.9	83.2	85.3	93.2
IV	25.7	45.8	46.6	51.2

注: I、III、IV 为不同的水泥品种编号。

热学性能是温度计算的基础资料,其中尤以  $Q_0$ 、 $m$  更为重要。由于各种推算方法有



时出入很大,故应采用多种方法推算并参考其他工程资料、水泥品种选择、现场测试等多种手段进行比较确定。重大工程最好进行混凝土绝热温升试验。

### 三、混凝土力学及变形指标

温控所需的力学指标包括混凝土的抗压强度( $R$ )、抗拉强度、弹模( $E_c$ )、混凝土成熟度( $M$ )与强度关系。

#### (一)抗压强度与龄期、成熟度的关系

抗压强度与龄期、成熟度的关系式为

$$R = G \lg \tau + H \quad (1-2-9)$$

$$R = g \lg M + h \quad (1-2-10)$$

$$M = \sum_{i=1}^n (10 + T_i \tau_i) \quad (1-2-11)$$

式中  $\tau_i$ ——养护时间;

$T_i$ —— $i$ 时段内混凝土温度的平均值;

$G, H, g, h$ ——试验常数;

其他符号意义同前。

#### (二)抗拉强度

轴心抗拉强度( $\sigma$ )与劈裂抗拉强度( $\sigma_p$ )的关系为:

$$\sigma = (1.22 \sim 1.37) \sigma_p \quad (1-2-12)$$

轴心抗拉强度( $\sigma$ )与抗压强度( $R$ )关系式为:

$$\lg \sigma = \lg K + m \lg R \quad (1-2-13)$$

式中  $K$ ——取 0.3~0.4;

$m$  约等于 0.7。

一般  $\sigma = (1/8 \sim 1/10)R$ 。当受荷弯曲时,考虑塑性变形,弯曲抗拉强度( $\sigma_R$ )可以适当提高。一般  $\sigma_R = r\sigma$  ( $r$  为拉力区塑性系数,可取 1.3~1.6)。

根据梁的抗弯试验,梁的各点强度按 Weibull 分布函数分布。

试验结果  $m$  取值 7~13,受压时可取 13,受拉时可取 7。按 Weibull 公式(未做抗弯试验)计算的  $r$  见表 1-2-11。

表 1-2-11 拉力区塑性系数  $r$

$V^*$		取全部拉区体积			取纯弯段拉区体积		
		7	10	13	7	10	13
加载 方式	纯弯	1.48	1.36	1.29	1.48	1.36	1.29
	四分点弯曲	1.58	1.45	1.35	1.64	1.46	1.36
	三分点弯曲	1.68	1.50	1.39	1.74	1.52	1.41
	中心点加载	2.00	1.73	1.58	2.16	1.79	1.61