

大体积混凝土 预冷技术

中国水力发电工程学会施工专业委员会 组编
翁定伯 编著

水利水电工程施工系统系列专著

*Shuili Shuidian Gongcheng Shigong
Xitong Xilie Zhuanzhu*



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

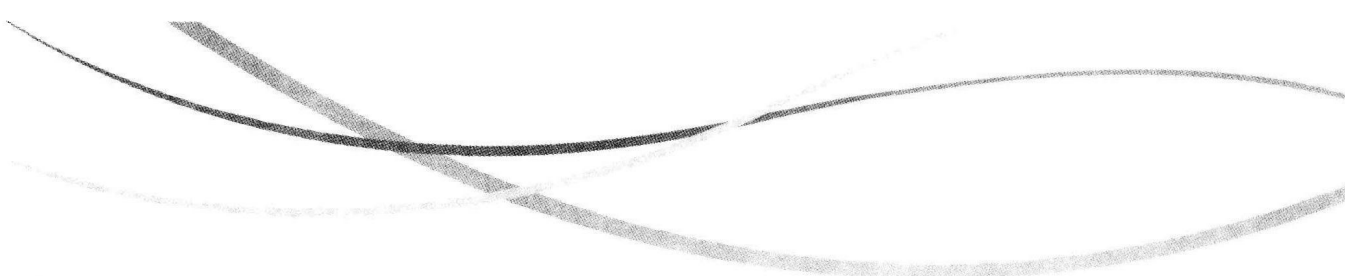
水利水电工程施工系统系列专著

大体积混凝土 预冷技术

中国水力发电工程学会施工专业委员会 组编
翁定伯 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



序

水利水电工程施工系统系列 **专著** 大体积混凝土预冷技术

我国水电建设经过百年历程，特别是改革开放后 30 年的快速发展，不论在装机总量、建设规模和筑坝技术等各方面都进入了世界领先水平，积累了极为丰富而宝贵的经验，作为筑坝技术重要内容的混凝土温度控制技术也获得了长足发展。

现代大坝混凝土温度控制技术起始于 20 世纪 30 年代修建的美国胡佛坝，当时主要采用了柱状浇筑和坝内埋冷却水管技术，此后又逐渐发展了混凝土预冷技术。

我国大坝混凝土温度控制技术早期应用较有代表性的是 20 世纪 50 年代中期兴建的三门峡和新安江两大水电站。此后随着工程的不断建设，混凝土预冷技术逐步发展提高，至 20 世纪 90 年代兴建的二滩、三峡等特大型工程，使这一技术进一步得到了提高和完善。

我国有关介绍水工混凝土温度控制技术的书籍主要有：①20 世纪 50 年代翻译出版的美国《混凝土坝的冷却》，该书主要介绍美国 20 世纪兴建的胡佛坝温度控制理论和方法；②20 世纪 70 年代出版的朱伯芳院士编著的《水工混凝土结构的温度应力与温度控制》，该书系统介绍了水工结构温度应力和温度控制的理论研究成果。但这两部专著对混凝土预冷技术部分未作详细探讨，因此，这一专业领域的系统理论和方法，我国尚处于空白。

中国水力发电工程学会施工专业委员会（以下简称施工专委会）的前身是工程施工系统专业委员会，当时的专业主要涉及筑坝系统、混凝土生产系统和砂石骨料生产系统。大体积混凝土预冷技术是施工专委会重点关注的内容之一，也是施工专委会组织工程施工系统系列专著的书目之一。

在我国水电工程的长期发展中，混凝土预冷技术方面也积累了丰富的经验。有的学者做了长期潜心研究，发表过多篇论文，提出了系统的创新性的研究成果，并在工程实践中作出过重要贡献。其中，较有代表性的学者是杭州机械设计研究所前副所长翁定伯先生，他对混凝土预冷技术的各个方面做过全面研究，提出了一些创新理论，并亲自负责过一些大型水电工程混凝土预冷系统设计，将研究成果应用于工程实践中。因此，施工专委会特请翁定伯先生为本部专著的主要执笔人。此外，还请了行业内一些工程技术专家提供了部分工程实际资料，均在有关章节中做了说明。

在本书书稿完成后，施工专委会组织了有关专家对书稿进行了讨论，并提出修改意见，在此，对参与阅稿的专家表示衷心感谢。

中国水力发电工程学会施工专业委员会秘书长 阮光华

2011 年 3 月

目 录

水利水电工程施工系统系列 专著 大体积混凝土预冷技术

序

第 1 章 概述	1
第 2 章 混凝土温度	3
第一节 新拌混凝土温度测定方法	3
第二节 粗骨料温度测定方法	3
第三节 混凝土原材料温度	4
第四节 混凝土组料的热学性能	5
第五节 新拌混凝土的温度计算	6
第 3 章 混凝土原材料的冷却方法	9
第一节 混凝土及其原材料的冷却方法	9
第二节 各组料温度变化对混凝土降温效果的影响	9
第三节 混凝土降温幅度与预冷方案组合	10
第 4 章 骨料的冷却机理	13
第一节 按球体理论第一边界条件计算的数学模型	13
第二节 按球体理论第三边界条件构建的数学模型	15
第三节 按平板理论第三边界条件构建的数学模型	17
第四节 放热系数	18
第五节 孔隙流冷却的设想	20
第六节 按孔隙流计算的数学模型	23
第 5 章 堆料场或储料罐的初冷	28
第一节 堆料场骨料的太阳辐射温升	28
第二节 表面水分蒸发对堆料场温度的影响	31
第三节 利用天然低温水喷淋冷却	32
第 6 章 骨料风冷	34
第一节 冷风的供应系统	35
第二节 冷却方式	36
第三节 骨料风冷计算	38

第四节	气流阻力和进出风口配置	49
第五节	料仓结构	56
第六节	冷风机	58
第七节	风冷系统的损耗	62
第 7 章	水冷骨料	67
第一节	水冷骨料概况	67
第二节	罐冷法	68
第三节	带式输送机喷淋冷却	76
第 8 章	加冰拌和和冰处理系统	83
第一节	冰的性状	83
第二节	冰系统规模	84
第三节	加冰工艺	86
第四节	片冰机和液冰系统	87
第五节	冰库	93
第六节	片冰输送	99
第七节	片冰调节仓和冰秤	102
第 9 章	液氮冷却骨料和混凝土	104
第一节	液氮制冷水、冰屑和冷却水泥	104
第二节	液氮冷却砂	106
第 10 章	真空法冷却骨料	108
第 11 章	二次筛洗和混合上料	111
第一节	二次冲洗筛分的必要性	111
第二节	混合供料（上料）和二次筛分的依存关系	111
第三节	混合上料的方法	112
第四节	二次冲洗筛分	113
第 12 章	大坝冷却水供应系统	119
第 13 章	混凝土冷却和节能	123
第一节	能耗和冷耗指标	123
第二节	预冷工程的冷耗和能耗	124
第三节	节能措施	125
第 14 章	制冷系统	130
第一节	制冷原理和制冷剂	130
第二节	压缩制冷系统的种类	131
第三节	制冷系统流程	131
第四节	供液方式和设备	135
第五节	制冷设备	136

第六节 制冷厂设计要求及其设备布置.....	150
第七节 制冷系统管路的设计.....	151
第八节 制冷设备和管路的隔热措施.....	155
第 15 章 部分工程混凝土预冷系统简介	159
简介 15-1 巴西伊泰普工程大坝混凝土预冷系统	159
简介 15-2 水口工程大坝混凝土预冷系统	161
简介 15-3 二滩工程大坝混凝土预冷系统	162
简介 15-4 小浪底枢纽混凝土预冷系统	163
简介 15-5 三峡二期工程混凝土预冷系统	163
简介 15-6 龙滩水电站工程 308.5m 高程混凝土预冷系统	166
简介 15-7 小湾工程混凝土预冷系统	167
简介 15-8 向家坝工程混凝土预冷系统	168
简介 15-9 溪洛渡工程混凝土预冷系统	169
参考文献.....	171



第 1 章

概 述

混凝土混合物中的胶凝材料遇水发生水化反应，放出大量热，俗称水化热。在混凝土漫长的凝固过程中，水化反应一直持续进行着。对于常态混凝土，水化热大约有 30% 是在最初的 3 天内，70%~90% 在 4 个星期内泄放出来。大体积混凝土的发热量如果不加控制或者其热量不能有效散发，可使混凝土温度上升 20~40℃。水化反应和其他原因引起混凝土温度升高，导致混凝土体积膨胀。在随后的冷却降温过程中，混凝土体积收缩受到基础或与之相连的结构物的约束，或者由于气温急剧变化产生内外温差，表层混凝土受自身内部约束而产生拉应力，可能引起结构物开裂。严重时，前者产生贯穿坝块的结构性裂缝，危害大坝（大体积混凝土结构）的安全；后者较多发生在寒流来临、表面温度急剧下降和（或）表面保护不力的情况下，在混凝土表面产生大小不等的裂缝，微小的细如发丝，肉眼不易辨别，大到表面裂缝，有时甚至贯穿整个坝块成为结构性裂缝。

混凝土大坝工程常采取温度控制的方法，防止和减小/减少裂缝。温度控制是一项复杂的系统工程，涉及坝体结构、材料科学、气象条件、工程热力学和施工方法等许多学科和工程措施，诸如采取提高混凝土强度、减少水泥用量、采用微膨胀水泥和低热胶凝材料、降低发热量、减小浇筑层厚度、延长间歇时间、减小块体尺寸、降低混凝土入仓温度、埋冷却水管通低温水进行后期冷却等措施。

最早大体积混凝土的冷却措施是采用后冷，以后逐步发展了预冷。所谓后冷指的是在坝内预埋冷却水管通低温水冷却。随着大坝散热理论的完善，自然冷却的方法得到了应用。保温系统（即隔热系统）也从仅仅用于表面防护扩展到内外温度梯度的控制。第一个在坝内采取埋冷却水管后冷措施的是 20 世纪 30 年代的胡佛坝。由于管内通冷水循环，加速了坝块的（冷却）收缩，因此可提前接缝灌浆，提前或按计划实现了坝体的整体性。埋冷却水管冷却混凝土成了当今大坝和其他大体积混凝土结构物的典型温度控制措施。通冷水循环一般在混凝土浇筑后几个星期或在较长一段时间后开始，有的工程甚至在混凝土浇筑后马上就通水冷却，用以防止和减少表面裂缝。由于后冷涉及温度控制众多方面，因此，本书仅就其与后冷有关的冷水制备和供应进行适当探讨。

预冷是指混凝土混合过程中和混合以前的原材料冷却，用以控制混凝土的初始温度和最高温度。预冷措施是目前最常用的，也是最有效的大体积混凝土的温度控制措施之一。从新拌混凝土到入仓浇筑这段时间，混凝土若再降温就极为困难，实际上还会有相当幅度的回

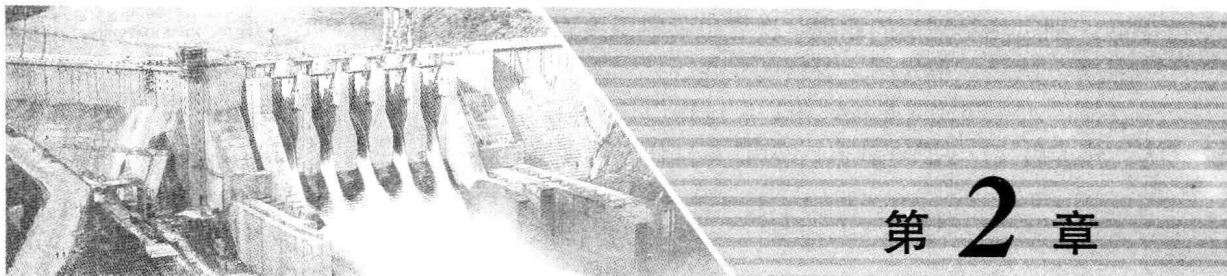
升。混凝土的冷却，一般均以搅拌机出机口为界，出机口前的冷却为预冷，入仓浇筑后的冷却为后冷。

刚从搅拌机出机口排出的新拌混凝土，虽然也发生了少量水化反应，但其和易性、可塑性、流动性基本上还属于原材料混合物的特性范围，确切地说，新拌混凝土还不是真正的混凝土，仅仅是混凝土的混合物。通常所说的混凝土预冷，实际上是指混凝土混合物及其原材料的冷却。从原材料进入搅拌机起，不同温度的原材料，在混合过程中发生热交换，在搅拌过程中还会产生机械热；水泥和水相遇发生了水化反应；冰与物料接触融化吸热。在搅拌机内短短的1~3min，远远无法使混合料的温度均化，从搅拌机出机口排出的混凝土，能用温度计检测到的只是砂浆或骨料的表面温度。在随后相当长的时间内，对于骨料粒径在75mm以上的混凝土，至少需要20min，新拌混凝土的温度才能基本均化。因此，讨论混凝土的出机口温度，实际上指的是包括机械发热在内混合料的热量加权平均计算的温度。预冷的任务是通过各种冷却技术降低多种原材料的温度，减少冷耗，满足温度控制对出机口温度的要求。

对于不同的原材料，可以有一种或多种降温方法，有直接和（或）间接的冷却方法或技术。直接冷却是指直接用制冷剂冷却原材料，主要有真空、液氮和片冰、冷（凉）水拌和等方法直接冷却原材料及其混合物；间接冷却则是指先冷却空气和水等载冷剂，然后用该载冷剂冷却混凝土的原材料。实际上，从简易、经济、有效、可靠和易操作性方面考虑，预冷主要是对粗骨料的冷却和对冷水及冰的制备。

无论是预冷还是后冷，都是混凝土降温的过程。但在混凝土预冷以后到后冷开始的一段时间内，是混凝土的吸热升温过程。该过程时间虽短，但幅度很大，需要增加预冷或后冷的幅度来补偿。由于影响预冷和后冷的因素极其复杂，因此更多的是要依靠实际经验的积累和统计资料的完善来对其进行分析和研究。

预冷是一种方法，也是一项工程，需要一系列的设备和设施来保证，所以称为预冷工程。本书从混凝土的温度、骨料冷却机理方面着重探讨风冷、水冷、加冰拌和等预冷的方法和设备，同时列举了一些应用液氮、真空等冷却方法的实际工程，并介绍为预冷、后冷提供冷量的制冷系统。



第 2 章

混 凝 土 温 度

新拌（湿）混凝土的温度，即通常所说的出机口温度和计及运输入仓振捣平仓吸热回升后的浇筑温度，即用于控制后冷的初始温度。新拌混凝土温度是预冷的目标温度，应该是在绝热条件下，经历相当长时间均化稳定后的温度。按照目前的测试仪表和方法，所能测定的骨料温度，基本上是它的表面温度；新拌混凝土温度实际上测的是砂浆的温度，也可能是临近骨料表面的温度，无法测得真实新拌混凝土的温度。而混凝土温度，对新拌混凝土而言，实际上指的是混凝土混合物加权平均的计算温度；对浇筑温度而言，指的是后冷的初始计算温度。

➡ 第一节 新拌混凝土温度测定方法

按照美国混凝土协会的报告（ACI207.1R），对于骨料粒径大于 76.2mm 的混凝土，可能需要 20min 才能使骨料和砂浆的温度均化。美国混凝土协会（ACI）为此制定了《新拌混凝土温度测定方法》（C1064—1986），并采用《新拌混凝土取样方法》（C172）取样。可以参照《新拌混凝土温度测定方法》用于出机口混凝土温度的测定。美国混凝土协会制定新拌混凝土温度的测定方法如下：

（1）盛装混凝土的容器需用非吸热材料（低热容量）制成，容器的各向尺寸至少应为最大骨料粒径的 3 倍，温度传感器周围应有 75mm 以上的空间。

（2）温度计的测量精度应达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，校验用的玻璃温度计精度应达 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。

（3）温度计或传感器的插入深度至少达 75mm，插入时间以温度读数稳定为准。

（4）需在取得试样后 5min 内进行温度测定。

上述新拌混凝土温度测定方法虽然规范，但比较麻烦费时，难以在实际生产中使用，仅可用作简捷测温法的校验和修正。

➡ 第二节 粗骨料温度测定方法

一般温度计只能测定骨料的表面温度，如果骨料粒径较大，特别是经过预冷（热）的骨料，可能存在内外温差，精确测定要采用物理学的方法。美国混凝土协会（ACI）是采用热

量仪，通过热量平衡的原理，换算出骨料温度。热量仪是一个隔热的标准容器，其测定原理和换算是：事先测定骨料的比热容 c ，取试样质量 m (kg)，和已知质量为 w (kg)、温度为 t 的水一起放入热量仪内，经过相当长的时间，水的温度稳定后，此时测得水的温度为 t_2 ，然后由式 (2-1)、式 (2-2) 计算试样的温度 t_1 ，即

$$t_1 = \frac{(w+k)(t_2-t)}{cm} \quad (2-1)$$

$$k = \frac{w_1(t_4-t_5)}{t_5-t_3} \quad (2-2)$$

式中 k ——热量仪的水当量，需事先确定。

确定 k 的方法为：首先向热量仪内充入温度接近室温的水，10min 后测定水的温度为 t_3 (和当时热量仪温度相近)，然后注入已知质量为 w_1 (kg)、温度为 t_4 (较高温度) 的水，再过 10min 测定水的温度为 t_5 。

➡ 第三节 混凝土原材料温度

混凝土的计算温度系原材料的加权平均温度，因此，计算前必须知道或确定混凝土各组料的温度。

一、水泥温度

通常水泥从磨机排出的温度为 90~150℃，用料罐储存之前一般可冷却到 50~80℃。由于水泥的热导率很低，因此在储罐内散热非常慢，在大型储罐内每月降温速度只有 2~5℃，在运输和装卸过程中可能再降 5℃；到达工地的温度一般为 30~50℃，有时也会高达 75℃。例如，当年葛洲坝工程水泥温度只有 40℃，而三峡工程由于运距较近最高温度曾达 65℃。

二、水的温度

大坝工程用水一般多取自河水，我国西南山区上游河段的河水温度常在 20℃ 以下。但是混凝土用水，虽取自河水，多经过泵送处理并在水池内储存，已不再是原始河水温度 (或取自多年水文资料的统计数据)。设计计算应考虑水的来源，在泵送、处理过程和储备期间受环境温度的影响。例如，从大型水池取水，水的温度常在当地月平均湿球温度上下波动。

三、骨料温度

骨料的自然温度，和当地的气温、相对湿度及储存条件有关。按 DL/T 5386—2007《水利水电工程混凝土预冷系统设计导则》，粗骨料的原始温度一般取多年的月平均 (干球) 温度。实际上，在堆料场露天储料，如果骨料干燥，并暴晒在太阳下，表层温度可比气温高出 10℃ 以上；反之，如骨料表层保持湿润，从料堆底部取料，骨料温度可降至湿球温度。相对湿度为 80% 时，骨料的温度比干球温度低 2~4℃，相应地可降低混凝土温度 1~2℃，从而可减少可观的制冷容量配置。《美国混凝土施工手册》建议采用月平均湿球温度作为粗骨料的计算温度。计算湿球温度可以利用相对湿度与干、湿球温度的关系 (见图 2-1)。

如已知当地的干球温度 26℃，相对湿度 $\varphi=70\%$ ，从 $t_g=26^\circ\text{C}$ 的水平线找到与 $\varphi=70\%$ 的交点 a ，从 a 点引水平线交湿球温度纵坐标，读得此点的湿球温度 $t_s=21^\circ\text{C}$ 。采用湿球温度作为计算温度，必须在料堆表面喷水，以始终保持骨料湿润，喷水量的大小应等于或略大于蒸发量。

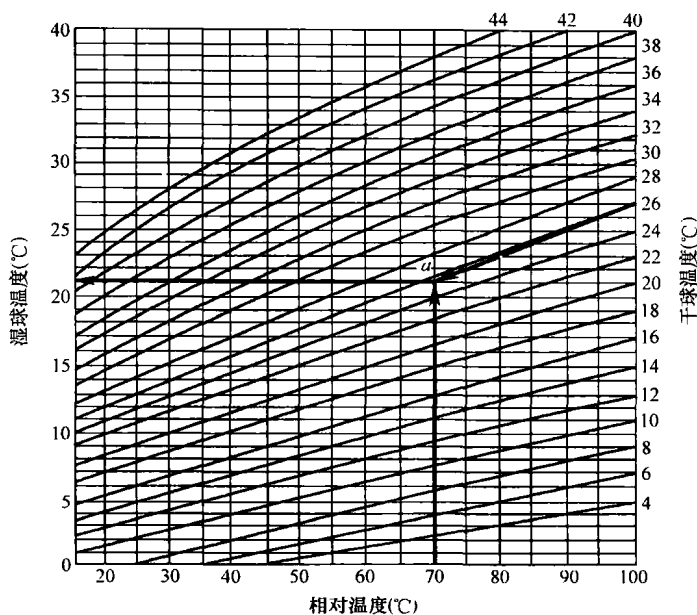


图 2-1 相对湿度与干、湿球温度的关系

➡ 第四节 混凝土组料的热学性能

在预冷的情况下,粗骨料的温度可能低于砂浆温度,不利于片冰的融化。加冰量不仅受混凝土用水和骨料含水量的限制,还要受水泥、混合料和砂等所能提供的平衡热量的制约。计算中的各项原始数据,应按具体工程的材料试验、级配设计和水文气象资料、交通运输条件确定。表 2-1 列举了一些工程的混凝土组料的热学性能,仅作参考工程资料时参考。

表 2-1 混凝土组料的热学性能

材料名称	比热容 $[\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})]$		热导率 $[\text{kJ}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h})]$	密度 (kg/m^3)	热扩散率 (m^2/h)
	范 围	典 型			
碎石		0.88	3.85	1.50~1.60	0.002 9
砾石		0.88	4.61	1.60	0.003 5
玄武岩	0.75~1.0		7.49		
白云岩	0.80~0.92		11.93		
片麻岩	0.75~0.84				
花岗岩	0.75~0.84		9.21		
石灰岩	0.75~0.92		11.51		
磁铁矿	0.67~0.70				
大理石	0.88~0.92				
流纹岩	0.75				
石英岩	0.67		11.51		
砂岩	0.88~1.05				
蛇纹岩	1.05~1.09				
粗面岩	0.92~0.98		7.49		
水泥	0.50~0.92	0.92	1.06		
水		4.19	2.09		
冰	2.05~2.1	2.09	8~19	0.4~0.45	0.004 2
砂	0.67~0.92	0.84	1.17	1.45	0.001
湿砂		0.92	2.51	1.50	0.001 8

第五节 新拌混凝土的温度计算

新拌混凝土的计算温度为各组料的加权平均温度，可按式（2-3）计算，即

t_c = (sum_{i=1}^n G_i t_i c_i + F t_c c_c + [w t_w - sum_{i=1}^n G_i r_i (t_w - t_i)] c_w) / (G_i c_i + F c_c + w c_w) (2-3)

骨料中通常都含有水分，如以含水骨料的比热容

c_i = c + 4.187 r_i / 100 (2-4)

表示，则式（2-3）可简化为

t_c = (sum_{i=1}^n G_i t_i c_i + F t_c c_c + w t_w c_w) / (G_i c_i + F c_c + w c_w) (2-5)

- 以上式中 G_i —— i 级骨料的含量，kg；
- t_i —— i 级骨料的温度，℃；
- c_i —— i 级骨料的比热容，kJ/(kg·℃)；
- F —— 水泥和掺合料(粉煤灰)的含量，kg；
- t_c —— 水泥和掺合料(粉煤灰)的温度，℃；
- c_c —— 水泥和掺合料(粉煤灰)的比热容，kJ/(kg·℃)；
- w —— 单位混凝土的实际加水量，kg；
- t_w —— 水的温度，℃；
- c_w —— 水的比热容，kJ/(kg·℃)；
- r_i —— 第 i 级骨料的含水率，以小数计。

式（2-3）稍加修改即可用于计算加冰混凝土搅拌机出机口的新拌混凝土计算温度，即

t_c = (sum_{i=1}^n G_i t_i c_i + F t_c c_c + w t_w c_w + 335 I η) / (G_i c_i + F c_c + (w + I) c_w) (2-6)

式中 w —— 实际加水量，kg，除从总用水量中减去砂石中的含水量外，再减去加冰量，一般不得少于稀释外加剂所需的用水量(10kg/m³)；

I —— 加冰量，kg；

η —— 片冰冷量利用率，可根据片冰的干燥程度选取 90%~100%。

为了方便计算，可以采用 Excel 电子表格计算混凝土出机口温度，见表 2-2。

表 2-2 混凝土出机口温度计算表

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	项目	组料用量	含水率	含水量	比热容	综合系数	温 度	热 量
2	单位	kg/m³	%	kg	kJ/(kg·℃)	kJ/m³	℃	kJ/m³
3	G1	498	0.2	0.996	0.92	462.33	28	12 945.33
4	G2	498	0.3	1.494	0.92	464.42	28	13 003.76
5	G3	332	0.5	1.66	0.92	312.40	28	8747.07

续表

	A	B	C	D	E	F	G	H
6	G4	332	1	3.32	0.92	319.35	28	8941.82
7	S	522	6	31.32	0.92	611.47	28	17 121.18
8	水泥	145		0	0.84	121.80	45	5481.00
9	F	62		0	0.84	52.08	45	2343.60
10	水	87		38.79	4.19	202.00	26	5252.00
11	片冰			0	-302	0.00		0.00
12	机械热							4000.00
13	合计	2476				2545.85		77 835.76
14	混凝土自然计算温度(℃)							30.57

例如：在表 2-2 中，B3~B10、C3~C7、E3~E11、G3~G10、D11、H12 均按工程实际数据输入，其他各单元设定如下：

D 列 5 行为 G3 骨料的含水量

$$D5=B5\times C5/100=3320.5/100=1.66\text{ (kg)}$$

F 列 5 行的综合系数

$$F5=B5\times E5+D5\times 4.19=332\times 0.92+1.66\times 4.19=305.44+6.96=312.4\text{ (kJ/m}^3\text{)}$$

H 列 5 行热量

$$H5=F5\times G5=312.4\times 28=8747.07\text{ (kJ/m}^3\text{)}$$

F 列 10、11 行的综合系数，是指净加水和以冰代水部分的综合系数，即

$$F10=(B10-D10-D11)\times 4.19=202\text{ (kJ/m}^3\text{)}$$

$$F11=D11\times 4.19=0$$

F 列 12 行为单位混凝土比热容

$$F12=\sum F3:F10=2545.85\text{ (kJ/kg}\cdot\text{℃)}$$

计算自然温度，是指不加冰，即 D11=0，设机械热取 H12=4000kJ/m³。

H 列 13 行为单位混凝土计算总热含量

$$H13=\sum H3:H12=77\,835.76\text{kJ}$$

H 列 14 行为混凝土出机口计算的温度

$$H14=H13/F13=30.57\text{℃}$$

只要按以上设定，表 2-2 可应用于任何工程、任何级配的混凝土温度计算。计算时，只需更改表 2-2 中的某(个)些参数，立即刷新得出新的计算结果，计算十分快捷。

表 2-3 为改变计算参数后的混凝土出机口温度计算表，表中片冰冷量利用率按 90%计。

表 2-3 改变计算参数后的混凝土出机口温度计算表

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	项目	组料用量	含水率	含水量	比热容	综合系数	温 度	热 量
2	单位	kg/m³	%	kg	kJ/(kg·℃)	kJ/m³	℃	kJ/m³
3	G1	498	0.2	0.996	0.92	462.33	0	0.00

续表

	A	B	C	D	E	F	G	H
4	G2	498	0.3	1.494	0.92	464.42	-4	-1857.68
5	G3	332	0.5	1.66	0.92	312.40	-4	-1249.58
6	G4	332	1	3.32	0.92	319.35	2	638.70
7	S	522	6	31.32	0.92	611.47	28	17 121.18
8	水泥	145		0	0.84	121.80	50	6090.00
9	F	62		0	0.84	52.08	40	2083.20
10	水	87		38.79	4.19	55.35	6	332.10
11	片冰			35	-302	146.65	-10 570	-10 570.00
12	机械热							4000.00
13	合计	2476				2545.85		16 587.92
14	混凝土计算温度(℃)							6.52

混凝土的机械热，通常是指混合料在搅拌机内的滚翻摩擦冲击发热，一般假定搅拌机功率的 70% 转化为机械热 (Q_m)，即

$$Q_m = \frac{0.7 \times 60 \times P\tau}{V} = 42P\tau/V \quad (\text{kJ/m}^3) \tag{2-7}$$

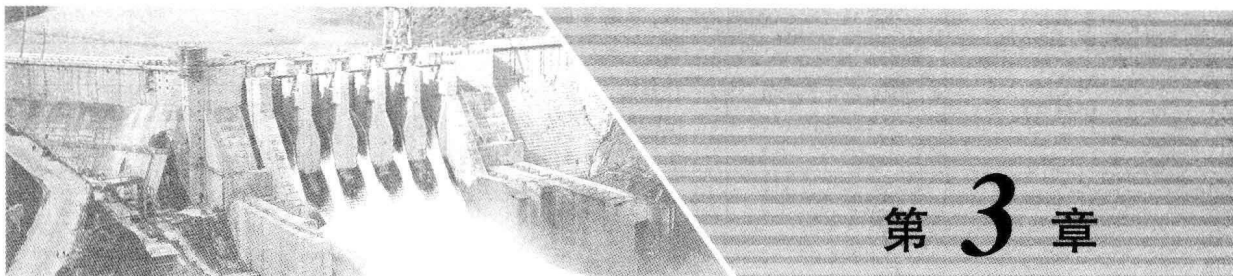
式中 P —— 搅拌机电动机功率，kW；
 τ —— 搅拌时间，min；
 V —— 搅拌机容量， m^3 。

强制式搅拌机的电动机功率虽大，但搅拌时间短，因此，其搅拌热和自落式搅拌机的搅拌热相差不多。

例如， 3m^3 自落式搅拌机的功率为 $2 \times 30\text{kW}$ ，搅拌时间为 3min，则 $Q_m = 2520\text{kJ/m}^3$ ； 6m^3 强制式搅拌机的功率为 $270 \sim 300\text{kW}$ ，搅拌时间为 75s，则 $Q_m = 2363 \sim 2625\text{kJ/m}^3$ 。

实际上，原材料温度指的是进楼（站）前的温度，在运输、入仓、计量等过程中物料的转载、摩擦、冲击所增加的热量，也应是机械热的一部分。根据国内外的经验，通常取全部机械热 Q_m 为 4000kJ/m^3 ，大致相当于使混凝土温度升高 1.5°C 。

虽然，混凝土的自然温度习惯上都未考虑机械热，但对任何实际工程总是存在机械热。从评估一个工程混凝土的降温幅度看，把机械热计入自然温度应该更符合实际。



第 3 章

混凝土原材料的冷却方法

混凝土原材料（组料）主要有粗细骨料、胶凝材料（水泥、粉煤灰）和水。此外，还有为改善混凝土性能的各种外加剂。混凝土原材料从其混合那一刻开始，即产生水化反应而改变自身的性能。因此，除液氮、真空法和片冰可以直接在搅拌期间降低混凝土温度外，混凝土预冷就是混凝土原材料的冷却，新拌混凝土的计算温度原则上就是所有组料的加权平均温度。

➡ 第一节 混凝土及其原材料的冷却方法

混凝土及其原材料的冷却方法有直接法和间接法两种，真空和液氮冷却可直接用于水和粗、细骨料的冷却，水和冰则可用制冷剂直接制备；大量的骨料预冷则需通过冷空气和冷水作载冷剂来间接冷却。

降低新拌混凝土温度常用的方法如下：

- (1) 低温水和以冰代水拌和混凝土。
- (2) 风冷粗骨料。
- (3) 水冷粗骨料。
- (4) 砂的冷却。
- (5) 液氮冷却。
- (6) 真空冷却粗、细骨料。
- (7) 在热交换器内冷却砂和水泥。

➡ 第二节 各组料温度变化对混凝土降温效果的影响

混凝土各组料的用量和比热容不同，其每变化 1°C 对混凝土降温效果的影响相差很大，主要取决于混凝土的级配和原材料的热学性能。以若干大坝混凝土的级配和原材料热学性能为例，其每变化 1°C 对混凝土降温的影响范围见表 3-1。

表 3-1 组料冷却对混凝土降温的影响范围

组料名称	单位混凝土用量 (kg/m³)	比热容(含水) [kJ/(kg·℃)]	每变化 1℃	
			需热量 (kJ)	可降混凝土温度 (℃)
粗骨料	1600~1700	0.8~0.92	1500~1600	0.55~0.65
砂	500~600	1~1.1	600	0.20~0.25
胶凝材料	200	0.8~0.92	170~200	0.07~0.10
水	80~100	4.2	320~400	0.1~0.15
片冰	<50	2.1		0.14~0.15 ^①

注 冰的融解热为 335kJ/kg。
① 表中片冰可降混凝土温度是指每千克片冰的降温幅度。

➡ 第三节 混凝土降温幅度与预冷方案组合

目前很多工程要求新拌混凝土的温度降到 7℃，我国南方和长江中下游地区的大坝工程，混凝土自然温度多在 30℃左右，要求降温幅度达 20~25℃；西南山区河流上游地区的降温幅度一般也在 15℃上下。从经济和实用的角度看，没有一种单一的冷却措施可以经济地满足预冷要求，降温幅度大时，常常要采用多种措施，甚至采用两级接力进行冷却。

一、冷水和片冰拌和

低温冷水拌和降温，是所有工程首选的措施，是因为水本身就是混凝土组料，其冷量可全额利用，而且制备冷水的蒸发温度高、制冷效能系数高、制备方法简单容易、可利用已有的拌和设施，是一种最为经济、便捷和节能的降温方法。早期混凝土预冷，由于混凝土用水量较多，要求降温幅度不大，冷水拌和的效果显著。对于自然混凝土计算温度为 30℃的混合物，净加 3℃、100kg 的冷水拌和，可利用冷量约 10 000kJ，混凝土净降温达 4℃。随着片冰的采用，大部分混凝土用水被冰替代。大体积混凝土，本来用水量就不多，加冰再扣除骨料含水，真正净加拌和水所剩的只有稀释外加剂、湿润骨料和搅拌机体的“冷水”了。同时由于要求新拌混凝土温度低达 7℃，与冷水的温差很小，冷水拌和能提供的降温幅度也只有 0.1~0.2℃。即使如此，拌和用水总是要尽量利用冷水。

以冰代水，利用片冰相变，可提供大量的融解潜热，而且片冰是唯一可以储存冷量的，即时调节出机口温度，削减高峰负荷的载冷剂，其本身又是混凝土的组成成分，是最有效、最简易、最灵活的冷却方法，几乎是目前混凝土预冷工程的一项首选的也是必备的措施。但是，由于加冰量的限制，片冰和冷冻水在混凝土预冷负荷中只能承担不到 30%的份额。

二、粗骨料的冷却

粗骨料在混凝土中按质量计要占到 70%~75%的份额，每降低 1℃，混凝土的降温幅度达 0.55~0.65℃，在预冷工程中，通常要承担预冷总负荷的 70%以上。从技术成熟、经济实用，适于大规模、大幅度的降温措施方面考虑，混凝土预冷首选粗骨料的冷却。粗骨料冷

却既可以采用真空和液氮直接冷却方法,也可以采用以空气和水作载冷剂的间接冷却方法,但普遍采用的还是间接冷却方法,也即通常所说的风冷和水冷。水的热容量大、热交换效率高、能耗系数低,用水作载冷剂,容易做到高效和节能。我国早期和国外的预冷工程多以水冷为主。

由于水的温度受冰点限制,较难安全、经济地降到 3°C 以下,而且水冷后还需脱水并辅以风冷保温或进一步降温,因此通常需要采用两级冷却。风冷措施相对简单,可以将骨料温度降到 0°C 以下,而且冷风本身就是很好的保温措施,可以维持已冷骨料的温度,特别是风冷后不需要脱水,在降温幅度不是太高或预冷规模不是很大的工程中,只需在搅拌楼一级冷却就可满足要求。风冷也和水冷一样,可增加一级地面冷却,和搅拌楼风冷接力,构成两级风冷。两级风冷近来在我国得到了广泛应用。

三、其他冷却措施

砂在混凝土中的份额占到 $1/4\sim 1/3$,而且其含水率甚高,从而其综合比热容也高。砂每降低 4°C ,就可使混凝土温度降低 1°C 。冷却砂子,可以减轻对混凝土其他组料的降温幅度要求,并在较高的温度工况下运行,从而取得较高的技术经济效益。砂的颗粒小,应该容易被冷却。但是,砂的孔隙小,风冷空气不易穿透,水冷又不易脱水、排干,接触传热又因热导率太低,因此不容易降温;在气流中对流冷却,则受风速或风量的限制,冷却能力不高;真空冷却则容易使砂表面冻结。

砂和水泥具有相近的冷却特性,可用真空和液氮直接冷却。特别是在核电、桥梁和小型零星工程中,应用液氮直接冷却,设施简单、有效;但对规模巨大的大坝工程,出于经济方面考虑和大量液氮供应困难,实际应用还不多见。

四、冷却方案组合

对于平均气温在 25°C 以上,要求生产 10°C 以下的新拌混凝土,没有一种单独的、单级的冷却方法可以满足大规模混凝土生产要求,必须因地制宜地根据不同的降温幅度,采用多种组合的冷却措施,一般首选冰冷(当然包含冷水拌和);在冰冷不能满足要求时就再增加搅拌楼风冷;当冰冷、搅拌楼风冷不能满足要求时,则采用两级接力冷却。除了冰冷和液氮冷却能够做到“即冷即用”外,水冷和风冷都需要在骨料进搅拌机前 $1\sim 2\text{h}$ 启动冷却设备。冷却后的骨料如果不能马上拌和成混凝土,则必须保温储存,最好的保温方法是通冷风保温。因此只要是粗骨料预冷,就应该采取搅拌楼风冷措施,这样既能降温,又能保温。由于搅拌楼的料仓截面、高度、容量和高空配置冷风机受空间限制,因此降温幅度不够或出于经济和降低能耗方面考虑,需要增加一级地面冷却。通常所说的水冷或楼外风冷,多设在地面,是两级冷却中的第一级。采用搅拌楼风冷,是否还需要地面冷却,不但要看冷却幅度大小,还要看冷混凝土的生产能力。如果冷混凝土生产能力不高,在冷却料仓采取适当的措施和有足够的时间或风量把骨料的温度降下来时,就不一定采用两级冷却;反之,即使降温幅度不高,但生产规模巨大,受设备和骨料储仓容量的限制,无法提供足够的冷风或冷却时间,往往需要两级冷却。在这种情况下,比较经济的做法是,由于地面冷却受平面和空间约束相对较小,因此可以承担主要冷却负荷,而楼上风冷仅仅作保温和辅助冷却,例如,二滩工程风冷仅占总冷负荷的 10% 。这是因为搅拌楼风冷的冷风温度较低,制冷系数较低;而地面一级冷却,工作在较高温区,制冷系数较高。预冷的组合方案需要根据冷混凝土生产规模、降温幅度优化配置。表3-2所列的方案组合可供参考。