

# 混凝土冬季施工工艺学

项 翥 行 著



中国建筑工业出版社

# 混凝土冬季施工工艺学

项 翥 行 著

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书全面叙述了混凝土工程的冬季施工工艺。共分工艺基础、养护工艺和质量控制三部分内容。在工艺基础部分,从理论上阐明了混凝土的受冻机制及防冻原理,提出了混凝土温度计算方法和强度估算方法;在养护工艺部分,根据混凝土受冻时间划分为正温养护、负温养护和综合养护三大类,分别介绍了工艺原理、施工方法、计算公式和工程实例;在质量控制部分,提出了冬季施工工程的质量检查与评定方法。

本书集中反映了本领域的最新科技成就,可供北方地区的土建施工技术人员、有关科研人员 and 高校师生参考。

\* \* \*

责任编辑 余永祯

## 混凝土冬季施工工艺学

项 翥 行 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店经销

北京市顺义县燕华印刷厂印刷

\*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 7<sup>5</sup>/8 字数: 203 千字

1993年8月第一版 1993年8月第一次印刷

印数: 1—4,600册 定价: 5.80元

ISBN 7—112—02053—0/TU·1558

(7073)

## 前 言

我国北方广大地区，冬季时间长，气温低，为了使建筑业实现常年均衡施工，以推动经济建设的发展，必须组织冬季施工。混凝土是一种应用极其广泛的建筑材料，是构成建筑物主体的重要组成部分。由于混凝土自身的特点，环境温度对工程质量的影响极大。因此混凝土的冬季施工技术是建筑业面临的一个重大课题。

我国从50年代初期开始组织冬季施工，40年来，建筑业在冬季寒冷条件下完成了巨大的工作量，为国民经济的发展作出了应有的贡献。在长期的工程实践中，取得了丰富的经验，同时也付出了沉重的代价。因冬季施工措施不当而发生的质量事故时有所闻，在实际工作中，有的施工人员由于心中无数而盲目地同时采取多种措施以致造成损失浪费也屡见不鲜，往往在造成浪费的同时还出现许多质量隐患，使建筑物的寿命降低，使用功能减弱。

混凝土冬季施工技术是一个具有普遍意义的课题，受到国际学术界的关注。国际建材与构件试验联合会（RILEM）、美国混凝土学会（ACI）、美国波特兰水泥协会（PCA）以及原苏联等国家和学术团体，都颁布有专门的混凝土冬季施工规范，作为指导施工的依据。

然而，欧美国家进行冬季施工的主要手段仅限于蓄热法和暖棚法，技术比较单纯，应用面较窄。在拌合物中掺入防冻剂和对混凝土进行人工加热的方法始于原苏联。但在原苏联，虽然将某些化工产品作为防冻剂使用，却没有防冻剂的检验标准，掺防冻剂混凝土的合格性评定标准也未列入有关规范。规范中的其他规

# 目 录

## 第一篇 工艺基础

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一章 概论 .....           | 1  |
| 第二章 冬季气候与混凝土工程 .....   | 1  |
| 第三章 混凝土组成材料的工艺性能 ..... | 8  |
| 第一节 水泥 .....           | 8  |
| 第二节 骨料 .....           | 14 |
| 第三节 外加剂 .....          | 16 |
| 第四节 水 .....            | 38 |
| 第四章 负温对混凝土的影响 .....    | 39 |
| 第一节 混凝土的基本性能 .....     | 39 |
| 第二节 拌合水的冻结和相变 .....    | 48 |
| 第三节 负温对新拌混凝土的影响 .....  | 50 |
| 第四节 负温对硬化混凝土的影响 .....  | 63 |
| 第五章 钢筋的腐蚀与防护 .....     | 66 |
| 第一节 钢筋腐蚀机理 .....       | 66 |
| 第二节 混凝土对钢筋的            |    |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 保护作用 .....              | 67 |
| 第三节 钢筋腐蚀的原因 .....       | 67 |
| 第四节 防止钢筋腐蚀的措施 .....     | 69 |
| 第六章 混凝土的制备、成型与拆模 .....  | 72 |
| 第一节 材料加热与混凝土拌制 .....    | 72 |
| 第二节 拌合物的运输与浇筑 .....     | 73 |
| 第三节 拆模 .....            | 74 |
| 第七章 混凝土的温度计算 .....      | 76 |
| 第一节 拌合物温度计算 .....       | 76 |
| 第二节 混凝土冷却过程计算 .....     | 80 |
| 第三节 构件内部温差计算 .....      | 88 |
| 第八章 混凝土的强度估算——成熟度 ..... | 90 |
| 第一节 强度估算的原理、目的与意义 ..... | 90 |
| 第二节 成熟度表达式的提出与发展 .....  | 91 |

|                       |                 |       |     |
|-----------------------|-----------------|-------|-----|
| 第三节                   | 研究方法            | 与结果   |     |
| 分析                    | .....           | 92    |     |
| 第四节                   | 研究结论            | ..... | 97  |
| 第五节                   | 应用方法            | ..... | 99  |
| 第六节                   | 成熟度的实地检测技术      | ..... | 101 |
| <br><b>第二篇 正温养护工艺</b> |                 |       |     |
| 第一章                   | 概论              | ..... | 104 |
| 第二章                   | 混凝土的早期抗冻能力      | ..... | 108 |
| 第一节                   | 一次冻结对混凝土的影响     | ..... | 109 |
| 第二节                   | 反复冻融对混凝土的影响     | ..... | 114 |
| 第三节                   | 一次冻结与反复冻融的比较    | ..... | 116 |
| 第四节                   | 混凝土早期抗冻的机制      | ..... | 117 |
| 第五节                   | 对各国有关规定的评述      | ..... | 118 |
| 第六节                   | 关于临界强度与临界成熟度的比较 | ..... | 119 |
| 第七节                   | 研究结论            | ..... | 120 |
| 第三章                   | 暖棚法             | ..... | 121 |
| 第一节                   | 工艺特点            | ..... | 121 |
| 第二节                   | 暖棚构造            | ..... | 121 |
| 第三节                   | 能耗计算            | ..... | 123 |
| 第四节                   | 工程实例            | ..... | 126 |
| 第四章                   | 蓄热法             | ..... | 127 |
| 第一节                   | 工艺特点            | ..... | 127 |

|     |           |       |     |
|-----|-----------|-------|-----|
| 第二节 | 热工计算      | ..... | 128 |
| 第三节 | 构件特殊部位的处理 | ..... | 132 |
| 第四节 | 试验实例      | ..... | 134 |
| 第五章 | 电热法       | ..... | 136 |
| 第一节 | 工艺特点      | ..... | 136 |
| 第二节 | 能耗计算      | ..... | 137 |
| 第三节 | 电极法       | ..... | 140 |
| 第四节 | 工频感应模板加热法 | ..... | 144 |
| 第五节 | 线圈感应加热法   | ..... | 150 |
| 第六节 | 电热毯加热法    | ..... | 157 |
| 第七节 | 红外线加热法    | ..... | 159 |
| 第六章 | 蒸汽加热法     | ..... | 167 |
| 第一节 | 工艺特点      | ..... | 167 |
| 第二节 | 工艺原理      | ..... | 167 |
| 第三节 | 蒸汽室法      | ..... | 170 |
| 第四节 | 内部通汽法     | ..... | 170 |
| 第五节 | 蒸汽热模法     | ..... | 173 |

## 第三篇 负温养护工艺

|     |                |       |     |
|-----|----------------|-------|-----|
| 第一章 | 概论             | ..... | 178 |
| 第二章 | 负温养护混凝土的特性     | ..... | 179 |
| 第一节 | 昼夜间温度变化对混凝土的影响 | ..... | 179 |
| 第二节 | 混凝土的冷却过        |       |     |

|                |     |
|----------------|-----|
| 程 .....        | 181 |
| 第三节 混凝土负温养护    |     |
| 的效果 .....      | 183 |
| 第三章 抗冻临界强      |     |
| 度 .....        | 187 |
| 第四章 配合比设计      |     |
| .....          | 192 |
|                |     |
| 第四篇 综合养护工艺     |     |
| 第一章 概论 .....   | 196 |
| 第二章 工艺原理 ..... | 196 |
| 第三章 工艺参数的      |     |
| 选择 .....       | 197 |
| 第四章 混凝土综合养护    |     |
| 的效果 .....      | 202 |
| 第五章 抗冻临界强度     |     |
| .....          | 206 |
| 第六章 工艺设计 ..... | 209 |

|                |     |
|----------------|-----|
| 第七章 配合比设计      |     |
| .....          | 211 |
| 第八章 工程实例 ..... | 214 |
| 第九章 使用硫铝酸盐早    |     |
| 强水泥进行综合养护      |     |
| .....          | 215 |
|                |     |
| 第五篇 质量控制       |     |
| 第一章 温度测量 ..... | 218 |
| 第二章 质量检查 ..... | 220 |
| 附录A 混凝土强度增     |     |
| 长率 .....       | 222 |
| 附录B 建筑材料热物理    |     |
| 性能计算参数 .....   | 226 |
| 附录C 某些物质水溶液    |     |
| 的浓度、比重与冰点      |     |
| .....          | 227 |
| 参考文献 .....     | 231 |

# 第一篇 工艺基础

## 第一章 概 论

以水泥为胶结料、以天然砂石为骨料的普通混凝土，具有造价较低、经久耐用和可模性好的优点，被广泛应用于房屋建筑、道路桥梁和水利设施等工程领域，是当前国内外用处最多，用量最大的建筑材料。

混凝土通常由施工人员自行配制并在现场浇筑成型。在每立方米拌合物中，含有150~200kg的水。当气温降至0°C以下时，由于拌合水结冰，混凝土就会遭受冻害。因此混凝土工程的施工与气候条件关系甚大。

在我国，长江以北的广大地区，冬季都要出现负温天气。东北、西北和华北的各省、市和自治区，稳定的负温天气每年长达3~5个月。在冬季施工中，采用技术上先进、经济上合理的施工工艺，可使混凝土工程的安全性、适用性和耐久性得到保证，达到与常温施工相同的质量水平，还可使土建工程实现常年连续施工，这不仅对施工企业而且对整个国民经济，都具有巨大的经济价值。

## 第二章 冬季气候与混凝土工程

时令进入冬季，风雪交加，滴水成冰。恶劣的气候条件给混凝土作业带来巨大的困难。为了正确选择施工工艺，必须掌握天气形势及其变化情况。

施工人员要了解工程所在地以往年来所记载的气象资料，也要随时取得未来一段时间内的天气预报。但是，由气象台提供的天气预报，都是指一个较大的区域而言，其范围可达数公里甚至更大。而建筑工程所占地域总是较小，工地的小气候还受具体环境、地形和朝向的影响。因此，为了与气候条件作斗争，做到有备无患，施工人员还必须对有关的气象要素有一定的了解。

一、温度

当温度降至 $0^{\circ}\text{C}$ 时混凝土就会受冻。因而最低气温出现 $0^{\circ}\text{C}$ 之日混凝土工程就要进入冬季施工。混凝土浇筑后的保温构造、防冻剂掺量以及人工加热设备的装置都取决于气温。所以气温在冬季气象诸要素中居于最重要的地位。

气象台通常能够提供已经观测到的日最高气温、日最低气温和日平均气温的实测值。日平均气温是指1天内2时、8时、14时和20时等4次观测结果的平均值。这是在地面以上1.5m处测得的。气象台也能提供上述三个项目分别为候（5d）、旬（10d）和月的平均值。平均值只能表示一般情况，取平均值的范围愈大，实际值在平均值上下波动的幅度也愈大。例如某地某年一月份的平均气温为 $2.3^{\circ}\text{C}$ ，其时日最低气温已出现 $-7.6^{\circ}\text{C}$ 。

1天内最高气温与最低气温之差称为日较差。我国北方城市在冬季的日较差为 $10\sim 14^{\circ}\text{C}$ 。日较差的值随天气情况而变，图1-1为某地某一晴天和某一阴天在1天内的气温变化情况。

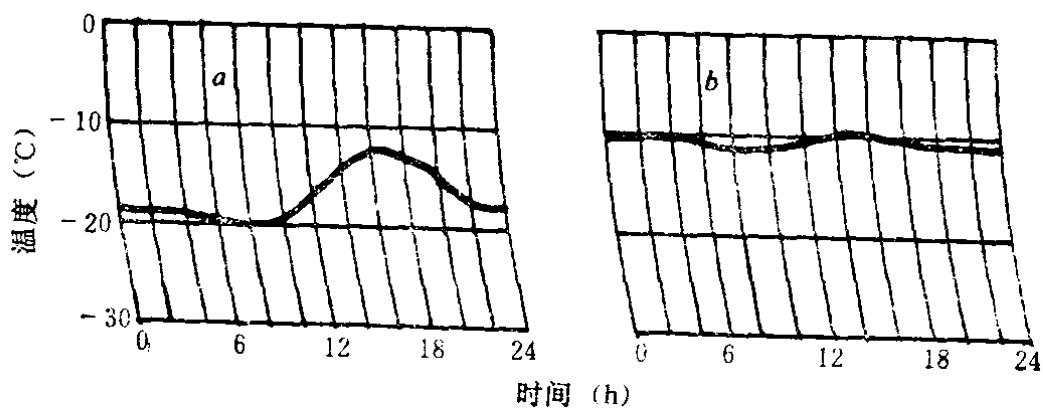


图 1-1 一天内的气温变化  
a—某一晴天； b—某一阴天

冬季来临时，气温逐渐下降，冬末又逐渐回升。下降和回升都是跳跃式的，寒流来临时又突然变化。图1-2为乌鲁木齐市自1980年10月至1981年3月逐日变化的温度曲线。

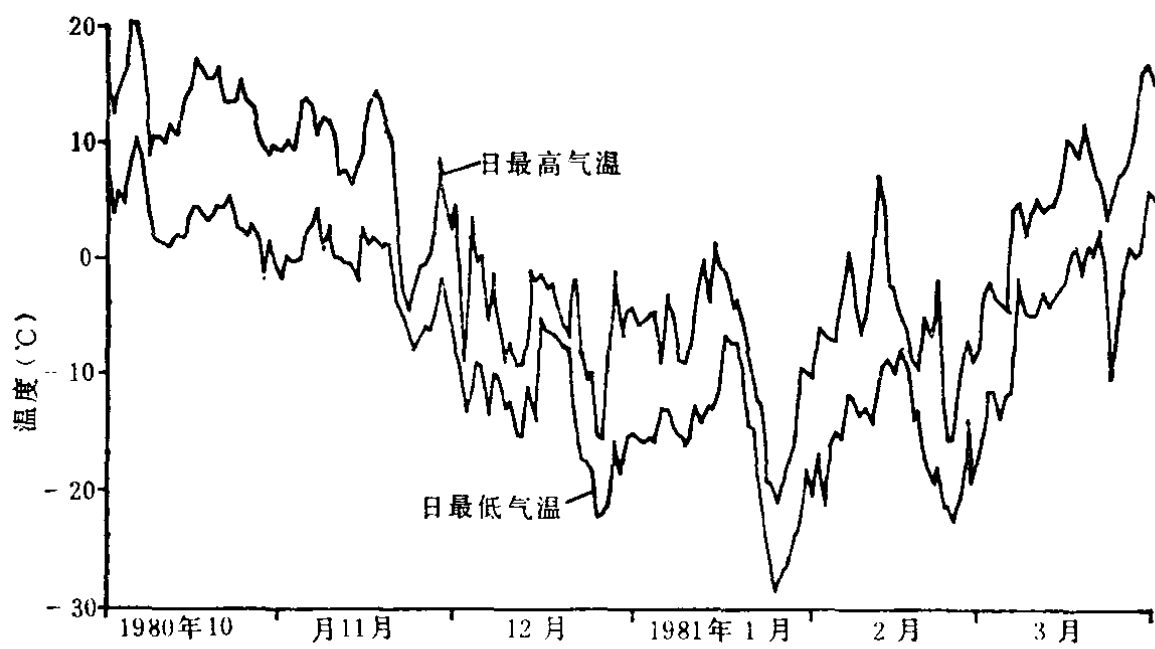


图 1-2 乌鲁木齐市某一冬季的气温记录

在人口密集的市区内，由于人类活动的“热岛效应”，气温通常比郊外空旷处为高。表1-1是兰州市1981年1月某日的气温观测记录。

兰 州 市 某 日 气 温 (°C) 表 1-1

| 地 点 | 测 温 时 间 |      |       |       |       |       |       |
|-----|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 2:00    | 8:00 | 14:00 | 20:00 | 日平均气温 | 日最高气温 | 日最低气温 |
| 市 区 | -4.9    | -7.2 | 0.1   | -0.1  | -3.3  | 8.7   | -11.1 |
| 郊 区 | -6.2    | -8.4 | 0.2   | -2.4  | -4.2  | 7.5   | -13.3 |
| 温 差 | 1.3     | 1.2  | -0.1  | 2.3   | 0.9   | 1.2   | 2.2   |

地形对气温有明显影响。同一时间内地面各点处的气温随地形而异。在地形平坦的地区，气温变化较小；在地形复杂的地区，气温变化很大，甚至地面稍有起伏，也会产生影响。这是由

于冷空气比重较大，它能朝低处流动并堆积在凹地里，形成“冷气池”的缘故。在冷空气流动过程中，地面被冷却，也使温度下降。尤其在夜间，因为辐射散热，温度变化更为明显。所以海拔高程愈小的地方，温度往往愈低。在已开挖的基坑内，温度就比平地为低。

图1-3是加拿大多伦多市在某一晴朗的冬季夜晚所测得的气温。湖岸附近温度最高，10km外的河谷温度最低，二者相差达19℃。

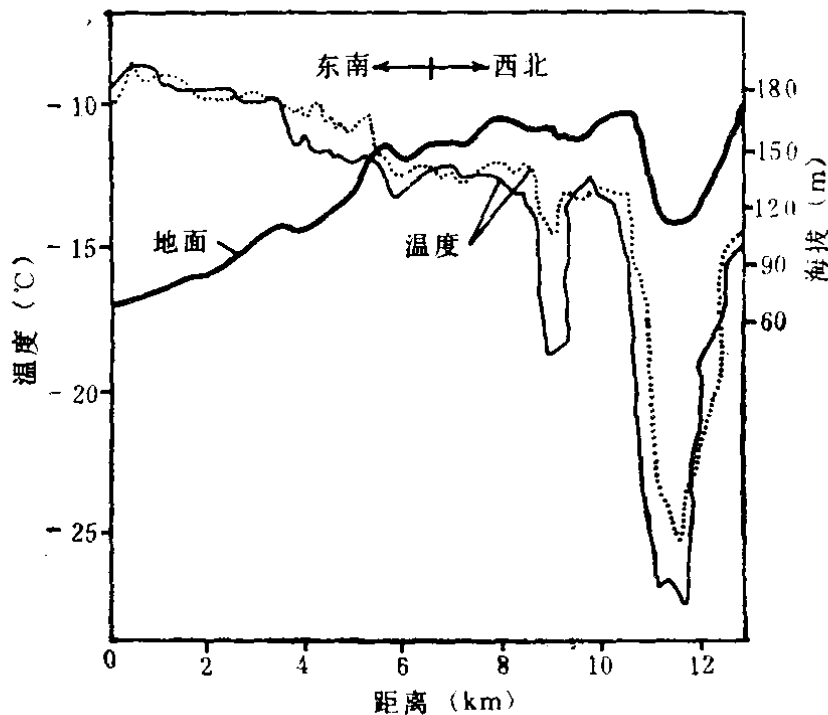


图 1-3 多伦多市某一冬季晴夜的气温

在凹地里的建筑物附近，由于“冷气池”效应，气温也明显偏低，如图1-4。

气温在地面以上4~80m范围内，变化并不很大。图1-5是德国来比锡市1934年4月1日6时至4月2日6时的实测结果。

二、风

我国大部分地区的风速，都是冬、春季大，夏、秋季小。这是因为冬、春季气压梯度大，寒潮和气旋活动频繁所致。

新疆、内蒙和黑龙江北部常年风向偏西，北方其他地区，冬季多为北风、西北风。

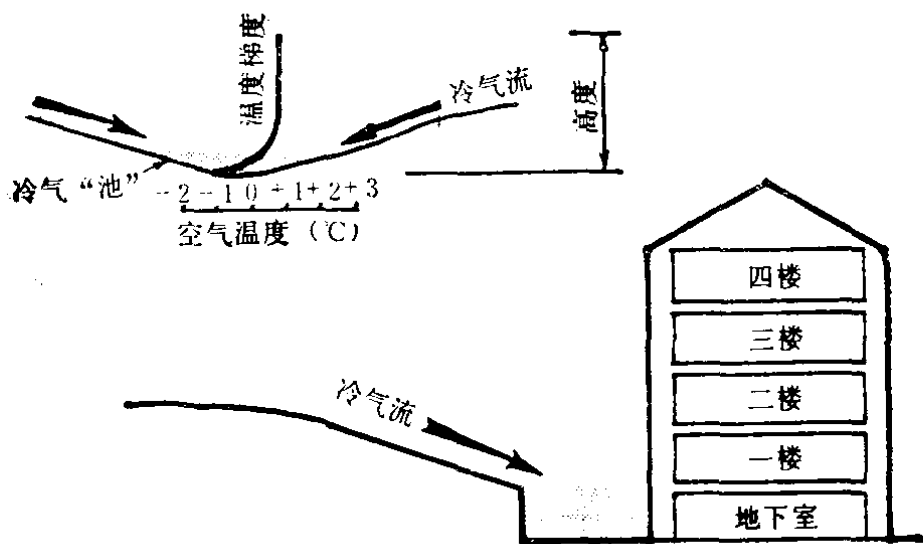


图 1-4 “冷气池”效应

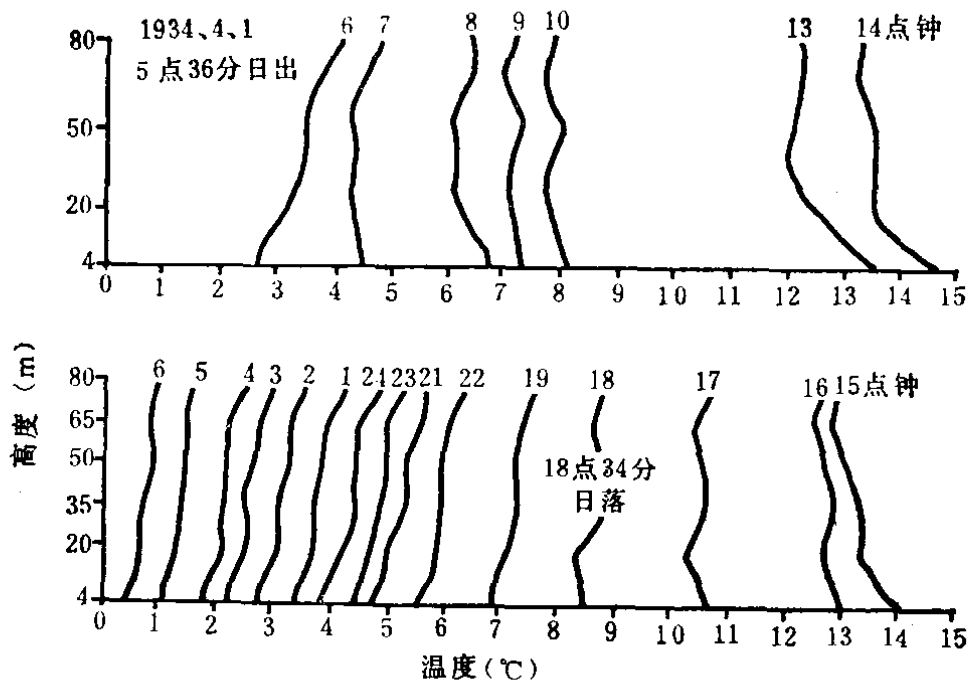


图 1-5 来比锡市1934年4月1~2日气温垂直分布

北方地区当寒潮或冷锋过境时会带来大风，成为灾害性天气。我国规定风力达到6级或6级以上时发布大风警报。

气象站的风速是在离地面10m处测得的。是10min内的平均值，风力等级与风速的关系如表1-2。

风速受天气形势、地面粗糙度和热力的影响。市区内由于建筑物多，平均风速比郊区低30~40%。市区的风速以午夜至日出前为最小，日出后逐渐增大，至16时为最大。图1-6为北京市

风 力 等 级 表

表 1-2

| 风 级 | 风 速<br>(m/s) | 风 级 | 风 速<br>(m/s) |
|-----|--------------|-----|--------------|
| 0   | 0~0.2        | 7   | 13.9~17.1    |
| 1   | 0.3~1.5      | 8   | 17.2~20.7    |
| 2   | 1.6~3.3      | 9   | 20.8~24.4    |
| 3   | 3.4~5.4      | 10  | 24.5~28.4    |
| 4   | 5.5~7.9      | 11  | 28.5~32.6    |
| 5   | 8.0~10.7     | 12  | 32.6以上       |
| 6   | 10.8~13.8    |     |              |

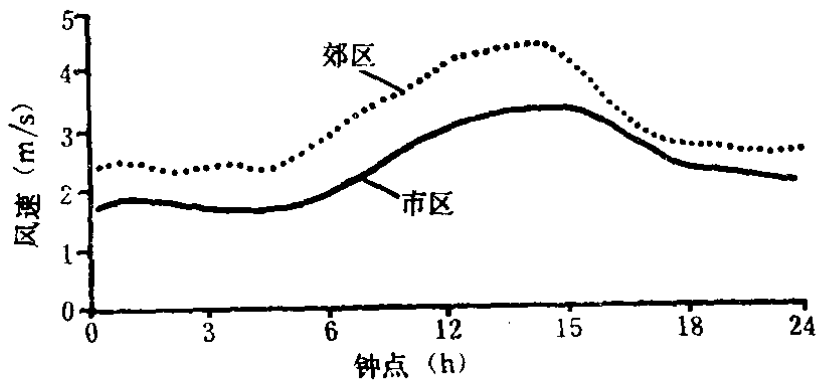


图 1-6 北京市某日风速日变化

1982年某日分别在市区和郊区所测风速的日变化。

风速的垂直分布，随高度的增加而增加。图1-7是北京市1977年冬季某日所测低空风的平均风速廓线。结果显示，在距地面10~200m的范围内，市区的垂直变化为2.6m/s，郊区为3.9m/s。

风力小于3级，对混凝土作业无影响。4级以上时，松散材料如锯末、炉渣等容易被风吹走。此时在保温层外面必须用不透风的材料如塑料薄膜、毛毡等包裹，以加强保温效果。风力大于6级时应停止浇筑混凝土。

大风会使混凝土的冷却速度加快，可能吹坏临时建筑物和保温覆盖层，在刮风天气要采取预防措施。

### 三、雪

降雪量系指每次所降雪量以同样重量水的深度来表示，分为：

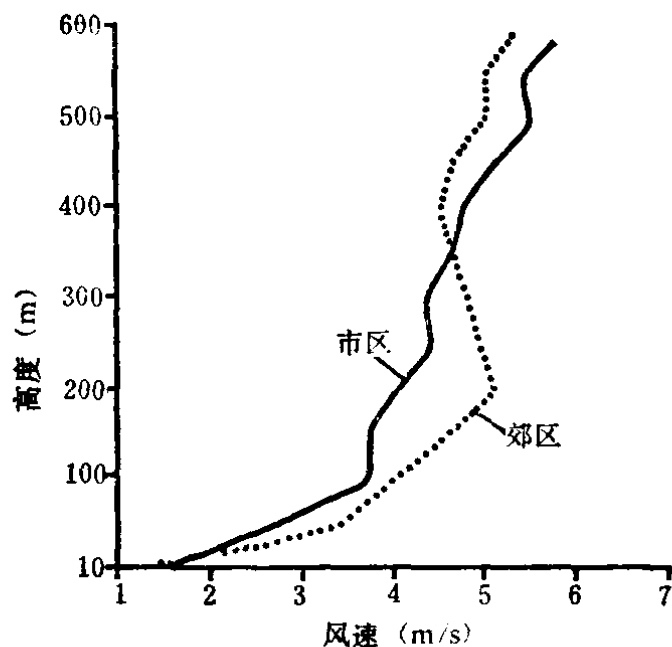


图 1-7 北京市某日低空平均风速廓线

- 微量  $< 0.2\text{mm}$ ;
- 小量  $0.3 \sim 3.0\text{mm}$ ;
- 中量  $3.1 \sim 8.0\text{mm}$ ;
- 大量  $> 8.1\text{mm}$ 。

雪的体积与相同重量水的体积之比约为5~10。

地面积雪由于反射热量而使空气温度更加降低，但土的温度会因积雪而提高。冬季降雪常常妨碍混凝土作业。露天堆放的材料如砂、石、钢筋，在下雪天应加以覆盖，以免积雪混入其中。新浇筑的混凝土表面，也必须加以覆盖保护。连续施工的混凝土结构，施工缝处必须保持清洁以防止冰雪混入。脚手架要加钉防滑条，雪后要立即清扫，以防人员滑倒。

#### 四、其他天气因素

雾使能见度降低，严重时使起重运输设备失灵，同样影响施工作业。雷暴可能引发雷击，工地应有预防措施。

### 第三章 混凝土组成材料的工艺性能

#### 第一节 水 泥

##### 一、水泥的成分

在工程中常用的硅酸盐类水泥是以石灰石和粘土为基本原料，有时为了满足化学成分的需要，还添加少量的石英和氧化铁，这些称为生料。生料在窑内经 $1300\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 的煅烧后成为直径 $6\sim 50\text{mm}$ 的深灰色多孔小球，称为熟料。熟料与适量石膏一起磨细，即成为硅酸盐水泥。分别用各种混合材，例如矿渣、火山灰质材料和粉煤灰与熟料、石膏共同磨细，即成为矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥。

硅酸盐水泥熟料由多种矿物成分组成，主要是表1-3所列4种。

硅酸盐水泥熟料主要矿物成分 表 1-3

| 名 称       | 分 子 式                                                             | 缩 写 符 号               | 含 量<br>(%) |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------|
| 硅 酸 三 钙   | $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$                                    | $\text{C}_3\text{S}$  | 30~60      |
| 硅 酸 二 钙   | $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$                                    | $\text{C}_2\text{S}$  | 15~37      |
| 铝 酸 三 钙   | $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$                           | $\text{C}_3\text{A}$  | 7~15       |
| 铁 铝 酸 四 钙 | $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{C}_4\text{AF}$ | 10~28      |

水泥在加水搅拌成浆以后逐渐凝结硬化，这是水泥水化反应的结果。水泥的水化反应实质上是各矿物成分的综合反应。不同的矿物成分有不同的反应速率，它们的生成物具有不同的力学强度。水化反应是一个放热过程，所放出的热量称为水化热，不同矿物成分的水化热也不相同。

硅酸三钙含量较高的水泥，早期强度较高，水化热很大；硅

酸二钙含量较高的水泥，早期强度较低，但后期可以达到较高的强度，水化热很小；水泥中的铝酸三钙遇水后水化速度极快，并能促进其他矿物的水化，水化热特大，但水化生成物的强度很低；铁铝酸四钙的水化热较小，主要还在后期放出，水化生成物的强度也很低。

水泥中所掺混合材对水泥的水化速率和力学强度有一定影响，混合材几乎不产生水化热。

每种矿物成分在常温下的累计水化热量见表1-4。

各种矿物成分的累计水化热量（20℃，J/g） 表 1-4

| 名 称               | 水 化 龄 期 （d） |     |     |     |      | 水 化 热<br>总 量 |
|-------------------|-------------|-----|-----|-----|------|--------------|
|                   | 3           | 7   | 28  | 90  | 180  |              |
| C <sub>3</sub> S  | 406         | 460 | 486 | 519 | 565  | 670          |
| C <sub>2</sub> S  | 62          | 105 | 167 | 197 | 230  | 352          |
| C <sub>3</sub> A  | 590         | 662 | 875 | 929 | 1026 | 1063         |
| C <sub>4</sub> AF | 176         | 251 | 377 | 414 | 544  | 569          |

各种矿物成分对水泥水化热的影响具有明显的加和性。因此当某种水泥中的矿物含量为已知时，可估算出在常温下于某个龄期时的累计放热量。

【例】 某种水泥，已知熟料在水泥中的含量为85%，各主要矿物成分在熟料中的含量 分别为： C<sub>3</sub>S——58.96%， C<sub>2</sub>S——7.04%，C<sub>3</sub>A——6.41%，C<sub>4</sub>AF——14.53%。试估算该种水泥在20℃条件下水化3d（天）时的累计放热量。

【解】 根据表1-4计算：

$$406 \times 0.5896 \times 0.85 + 62 \times 0.0704 \times 0.85 + 590 \times 0.0641 \times 0.85 + 176 \times 0.1453 \times 0.85 = 261.06 \text{J/g}$$

当水泥中的各种矿物成分含量为未知时，可根据水泥的化学成分求出。计算公式如下：

$$\left. \begin{aligned}
 C_3S &= 4.071CaO - 7.600SiO_2 - 6.718Al_2O_3 \\
 &\quad - 1.430Fe_2O_3 - 2.852SO_3 \\
 C_2S &= 2.867SiO_2 - 0.7544C_3S \\
 C_3A &= 2.650Al_2O_3 - 1.692Fe_2O_3 \\
 C_4AF &= 3.043Fe_2O_3
 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中  $C_3S、CaO\cdots\cdots$ —— $C_3S、CaO\cdots\cdots$ 在水泥中的含量。

【例】 某种水泥，已知其化学成分如下： $SiO_2$ ——20.73%， $Al_2O_3$ ——5.53%， $Fe_2O_3$ ——5.12%， $CaO$ ——61.40%， $MgO$ ——2.23%， $SO_3$ ——2.15%，烧失量——1.12%。试计算该水泥的矿物成分。

【解】 根据公式（1-1）计算：

$$\begin{aligned}
 C_3S &= 4.071 \times 0.614 - 7.6 \times 0.2073 - 6.718 \times 0.0553 \\
 &\quad - 1.43 \times 0.0512 - 2.852 \times 0.0215 = 41.81\%
 \end{aligned}$$

$$C_2S = 2.867 \times 0.2073 - 0.7544 \times 0.418 = 27.90\%$$

$$C_3A = 2.650 \times 0.0553 - 1.692 \times 0.0512 = 5.99\%$$

$$C_4AF = 3.043 \times 0.0512 = 15.58\%$$

经实验测得某些水泥的累计水化热量列出如表1-5。

实测某些水泥的累计水化热量（20℃，J/g） 表 1-5

| 序 | 名 称    | 龄 期 (d) |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|   |        | 0.5     | 1      | 2      | 3      | 7      | 14     | 28     |
| 1 | 普通525R | 127.99  | 220.77 | 279.51 | 321.38 | 373.79 | 400.30 | 402.69 |
| 2 | 普通425R | 110.49  | 218.80 | 267.74 | 292.24 | 323.93 | 341.94 | 344.15 |
| 3 | 普通425  | 120.29  | 205.07 | 238.94 | 259.83 | 289.47 | 306.85 | 308.73 |
| 4 | 矿渣425  | 56.61   | 142.31 | 197.95 | 231.32 | 273.69 | 303.63 | 320.37 |

水泥的水化反应与其他的化学反应一样，反应速率随温度的增高而增高，也随温度的降低而降低。水泥的水化放热量也随反应温度而异。图1-8是某种水泥在不同温度下的累计水化热量。

当水泥中矿物成分的含量为已知时，在任意温度、任意龄期