



氧化镁

混凝土筑坝技术

曹泽生 徐锦华 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



国家科学技术学术著作出版基金资助出版 76168

C 192

氧化镁混凝土筑坝技术

曹泽生 徐锦华 编著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

氧化镁混凝土筑坝技术为我国首创, 此项技术的研究进行了 20 多年。氧化镁混凝土筑坝技术是一项涉及多学科的课题, 包括水工结构、混凝土坝温度应力补偿水泥化学、混凝土变形及工程现场施工和原型观测等学科。实践证明, 该项技术不仅是一项简化温控的混凝土坝防裂措施, 也是一项快速施工的筑坝技术。

本书的内容包括: 氧化镁混凝土筑坝技术特点、基本方法及发展历史; 氧化镁混凝土筑坝温度应力补偿理论及设计方法; 水泥、混凝土中氧化镁的膨胀机理和变形控制; 采用氧化镁混凝土筑坝技术的工程实例。本书由国家科技学术专著出版基金和电力科技专著出版资金资助编著出版, 为国家资深水电专家所推荐。适用于水电水利工程设计、施工、科研、教学以及工民建、铁路、公路等大体积混凝土工程的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

氧化镁混凝土筑坝技术/曹泽生、徐锦华编著. -北京: 中国电力出版社, 2003

ISBN 7-5083-1437-9

I. 氧... II. ①曹...②徐... III. 氧化镁-混凝土坝-筑坝 IV. TV541

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 014348 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 6 月第一版 2003 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.25 印张 318 千字

印数 0001—2500 册 定价 48.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)



前言

氧化镁 (MgO) 微膨胀混凝土筑坝为我国首创。

MgO 微膨胀混凝土筑坝技术 (简称 MgO 混凝土筑坝技术), 是利用 MgO 混凝土的微膨胀补偿混凝土降温收缩的技术, 涉及混凝土坝温度应力补偿和 MgO 水泥膨胀机理两大内容, 这两项内容都是学科中的技术难点, 研究和实施有着比较大的风险, 这就决定了此项技术研究路途坎坷和历程漫长, 从白山重力拱坝温控设计 (1973 年) 算起陆陆续续地进行了 20 多年。

MgO 混凝土筑坝技术是一项多学科的课题, 包括有水工结构、混凝土坝温度应力补偿、水泥化学、混凝土变形、工程施工和原型观测等方面, 远非几个技术人员所能完成的, 而是课题组全体同志齐心协力共同取得的结果, 是长期以来各级领导和协作单位的同志支持帮助的结果。特别要感谢原水电部总工程师、中国工程院副院长潘家铮, 在课题研究最困难的时候, 给予的热情支持和指导, 使课题得以进行下来。对国家电力公司何璟顾问为 MgO 混凝土筑坝技术在重大工程中的推广, 并为本书筹划出版给予的极大帮助, 编著者在此表示衷心感谢。

实践证明 MgO 混凝土筑坝技术, 不仅是一项简化温控的混凝土坝防裂措施, 而且也是一项快速施工筑坝技术, 确实简化了施工并带来巨大经济效益。但是同时也要看到, MgO 混凝土筑坝的技术要求较高较严。为了使此项技术能够顺利地推广, 有必要将研究成果加以整理, 作一普及性的系统介绍。希望通过这本书来和大家共同切磋, 以使此项技术得到进一步推广、发展和提高。限于研究条件和编著者的水平, 书中定有不深、不透、不妥之处, 望同志们给予指正。

书中有关高镁水泥安定性部分取自建材研究院有关资料, 原华东水利水电勘测设计院总工程师韩祖恒为本书校审, 在此一并致谢。

MgO 混凝土筑坝技术课题组主要技术承担人如下:

1. 项目负责人

混凝土筑坝温度应力补偿研究

曹泽生 1973 年 ~ 1985 年 东北水利水电勘测设计院, 1985 年 ~ 1998 年 华东勘测设计研究院

2. MgO 水泥化学机理研究

唐明述 崔雪华 南京化工大学

3. MgO 混凝土变形特性研究

竺仁林 华东勘测设计研究院科研所

谭 元 水电第十二工程局科研所

李承木 成都勘测设计研究院科研所

4. 外掺 MgO 混凝土工艺研究

谭 元 水电第十二工程局科研所



目 录

序
前言

第一章 绪言

1

- 1—1 混凝土坝的防裂 1
- 1—2 MgO 混凝土筑坝的技术特点 2
- 1—3 MgO 混凝土筑坝的防裂 3
- 1—4 MgO 混凝土筑坝的快速施工 3
- 1—5 MgO 混凝土筑坝技术发展历程 4

第二章 混凝土坝温度应力补偿研究

8

- 2—1 混凝土坝温度场的特点 8
- 2—2 混凝土坝的各类体积变形 13
- 2—3 体积变形的约束和补偿 14
- 2—4 混凝土坝的两种主要约束形式 15
- 2—5 混凝土体积变形的时间效应 18
- 2—6 混凝土坝分层浇筑的补偿应力 21

第三章 混凝土坝温度应力补偿设计

24

- 3—1 MgO 混凝土筑坝有限单元法分析 24
- 3—2 混凝土坝温度应力补偿设计 40
- 3—3 MgO 混凝土温度应力补偿的效果 44
- 3—4 MgO 混凝土筑坝的表面保温 47
- 3—5 MgO 混凝土筑坝的原型观测 49

第四章 高镁水泥的膨胀机理概述

52

- 4—1 硅酸盐水泥中的 MgO 53
- 4—2 硅酸盐水泥熟料中的方镁石 53

4—3	影响高镁水泥膨胀的其他因素	61
4—4	高镁水泥长龄期的水化状态	63
4—5	高镁水泥常温长龄期的强度	66
4—6	高镁水泥常温长龄期的线膨胀变形	67
4—7	高镁水泥延迟膨胀的加速试验—压蒸试验	67

第五章 高镁水泥、混凝土筑坝的研究与工程实践

(白山重力拱坝)

72

5—1	白山重力拱坝温控设计及 MgO 混凝土温度应力补偿效果分析	72
5—2	高镁水泥、混凝土自生体积变形的研究	79
5—3	白山重力拱坝的施工	86
5—4	基础混凝土裂缝调查	90
5—5	基础混凝土变形观测	91
5—6	白山重力拱坝接缝开度分析	93
5—7	无应力计实测自生体积变形	96

第六章 外掺 MgO 原材料

99

6—1	MgO 煅烧制度的研究	99
6—2	MgO 原材料的工业生产	103
6—3	轻烧 MgO 的质量控制	107

第七章 外掺 MgO 水泥、混凝土的物理力学性能

109

7—1	外掺 MgO 水泥的物理力学性能	109
7—2	外掺 MgO 混凝土的物理力学性能	114

第八章 外掺 MgO 水泥、混凝土的膨胀变形

124

8—1	外掺 MgO 水泥膨胀性能	124
8—2	外掺 MgO 混凝土的膨胀变形性能	126
8—3	外掺 MgO 混凝土的徐变变形	135
8—4	外掺 MgO 水泥、混凝土的安定性	138
8—5	改进外掺 MgO 水泥、混凝土安定性检测手段及扩大 MgO 掺量的设想	139

第九章 外掺 MgO 混凝土拌和均匀性

141

9—1	混凝土 MgO 含量检测方法及均匀性指标	142
9—2	拌和机出料外掺 MgO 混凝土均匀性的研究	144
9—3	连续施工外掺 MgO 混凝土的均匀性	150

第十章 外掺MgO混凝土筑坝技术现场试验 (石塘水电站)

151

10—1 现场试验的基本要求	151
10—2 现场试验设计	151
10—3 观测成果分析	154
10—4 原型观测的应力复核	156
10—5 结束语	159

第十一章 外掺MgO混凝土筑坝工程实例

161

11—1 青溪水电站	161
11—2 水口水电站	178

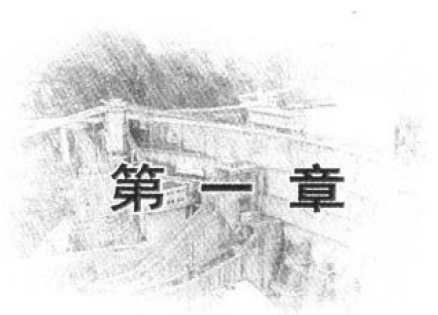
附 录

197

I. MgO微膨胀混凝土筑坝技术暂行规定(试行)及编制说明	197
II. 水利水电工程轻烧氧化镁材料品质技术要求(试行)	210
III. 水泥砂浆安定性试验方法——压蒸法(试行)	212

参 考 文 献

216



第一章

绪 言

1-1 混凝土坝的防裂

混凝土坝是水工建筑主要坝型之一，混凝土坝防裂是筑坝技术中重要课题。近百年来混凝土坝普遍采用的温度控制防裂技术，一直控制着工程质量，影响着建坝速度和工程投资。混凝土坝产生贯穿性裂缝，将导致大坝漏水，破坏坝的整体性，影响工程的耐久性，甚至危及坝身或整个枢纽工程的安全，历来为工程界所重视。早在 20 世纪 30 年代，美国修建的几座混凝土坝就存在裂缝问题，垦务局在修建胡佛坝时，进行了系统的温度及温度应力的研究，提出了柱状分块，薄层浇筑，水管冷却，低热水泥等温度控制措施旨在降低混凝土最高温度，减少温度应力。20 世纪 40 年代美国陆军工程师团又发展了预冷骨料措施，实现了大坝通仓浇筑，规定混凝土出机口温度控制在 10°C 以下。半个多世纪以来，世界各国修建的混凝土坝基本沿袭了美国这套温控措施，没有根本性的改变。

我国建国以来修建的混凝土坝，防裂技术也都是沿用柱状浇筑、加冰拌和、水管冷却等温控降温措施，20 世纪 60 年代刘家峡水电站搞过真空汽化预冷骨料试验，70 年代葛洲坝工程大规模采用人工制冷预冷骨料技术，创造了混凝土出机温度 7°C 的纪录，90 年代五强溪大坝开始采用块长超过 50m 的通仓浇筑技术。

20 世纪 50 年代起，我国工程院朱伯芳院士在总结前人经验基础上，提出的一套系统完整的混凝土坝温度场温度应力的理论设计分析方法，在理论方面就已经走在世界前列。

应该肯定，作为混凝土坝的防裂手段，传统的温度控制措施，确实起到了重要作用。但是温控措施技术繁难，成了它致命的缺陷，突出地限制了施工进度；大坝如果要通仓、连续浇筑，就需要庞大的预冷设备支持。在一定意义上讲，混凝土坝施工周期长，温度控制是其中原因之一。即便如此，温度控制稍有不当，仍会产生严重的裂缝，这样实例国内外并不鲜见。

世界进入 21 世纪，我国水利水电资源开发将置于重要战略地位，黄河、长江等大江大河要修建一系列高坝大水电站，因此，混凝土坝防裂技术如何摆脱传统温度控制的羁绊，实现筑坝高速度，仍然是水利水电事业的重大课题。

MgO 微膨胀混凝土筑坝技术（简称 MgO 混凝土筑坝技术），现在已经较好地解决了这一难题。通过二十多年的理论研究和工程实践，证实 MgO 混凝土筑坝技术既能做到防止

大坝开裂,又能简化温控措施,实现通仓连续浇筑,全天候快速施工。从根本上改变目前混凝土坝的施工面貌。

1-2 MgO 混凝土筑坝的技术特点

MgO 混凝土的膨胀源有两种:高镁水泥中所含的 MgO (内含 MgO) 及在水泥或混凝土中掺入的 MgO (外掺 MgO)。

一、MgO 混凝土膨胀的延迟性

水泥中“内含”MgO,或混凝土中“外掺”MgO,均为结晶致密的方镁石,它在水化过程中产生的膨胀变形,表现出一种独特的“延迟性”。这种延迟性膨胀正好符合了大体积混凝土散热慢、降温收缩变形迟缓的特点,而且由于混凝土在晚龄期弹性模量提高、徐变度低,单位膨胀量可以提供较高的预压应力,不容易被松弛,因而提高了混凝土膨胀能的储存效率。膨胀变形可以作为一种潜能存在坝内,待到几年后,大坝温度缓慢地降到稳定温度,出现最大收缩变形之前,这种潜在的膨胀能再缓慢地释放,抵消温度收缩,将收缩变形控制在混凝土极限拉伸范围之内,混凝土就不致开裂。只有 MgO 混凝土具备这种延迟膨胀的特性。

混凝土坝的温度控制,是为了减小坝体降温幅度。在混凝土浇筑以后,形成一定弹性模量之前,降低坝体最高温度,使以后坝体降温时所发生的收缩变形最小,防止发生裂缝。

MgO 混凝土筑坝,是用以调整、控制混凝土的体积变形,基本上不控制混凝土温度。利用其特有的延迟微膨胀性能,当坝体降温时抵消部分降温收缩变形,使总体变形收缩量减少或不胀不缩,以防止产生裂缝。

二、MgO 混凝土的安定性及外掺 MgO 混凝土的均匀性

毋庸讳言, MgO 微膨胀混凝土尚有其不利的一面,而这恰恰也表现在膨胀变形的延迟性上,即 MgO 混凝土的安定性。MgO 的水化发生在水泥或混凝土水化的后期,此时水泥石具备了一定的结构和强度,如果膨胀量过大,或延迟时间过长,势必造成混凝土的破坏崩解,即产生安定性问题。因此水泥界一向把水泥中的 MgO 视作有害成分,严格加以限制。

外掺 MgO 混凝土的均匀性实质也是安定性,如果 MgO 在混凝土中掺混得不均匀,局部掺量过大势必也会造成混凝土的破坏。因此,如欲利用 MgO 混凝土筑坝技术,必须首先解决其安定性问题。

经过近 20 多年的研究,为确保外掺 MgO 混凝土的安定性做了大量工作,无论在 MgO 原材料制备,还是在水泥混凝土试验、工艺设备以及施工控制等方面,都做到了延迟变形的可控性, MgO 混凝土安定性问题现在已经得到比较圆满的解决。为此,特别强调, MgO 混凝土筑坝,采用高镁水泥为膨胀源时,必须执行水泥国标 (GB 175—1992) 中有关 MgO

的规定。采用外掺 MgO 混凝土时,所用的 MgO 必须满足“水利水电工程轻烧 MgO 材料品质技术要求”。无论采用“内含”或“外掺”MgO 混凝土筑坝技术,均须进行温度应力补偿设计,在设计及施工中必须执行“MgO 微膨胀混凝土筑坝技术暂行规定(试行)”。

1-3 MgO 混凝土筑坝的防裂

MgO 混凝土筑坝的防裂技术包括两方面:①基础约束区浇筑 MgO 混凝土;②坝面保温。

一、基础混凝土防裂

MgO 混凝土的微膨胀变形和温度变形,都是非外力的“体积变形”,产生应力的必要条件是变形要有约束,即基础边界约束或坝体内外变形不均匀形成的内外约束。混凝土坝基础混凝土降温收缩时,受到基础的约束(或老混凝土约束),在约束范围内产生拉应力,应力超过混凝土抗拉强度则开裂,此时如果大坝基础部位浇筑 MgO 混凝土,其膨胀变形受到基础约束,产生预压应力,此预压应力对温度应力起补偿作用。因此,MgO 混凝土主要用在基础约束区(或老混凝土约束区)。

约束区以上坝体的变形,由于没有约束,属于自由变形,浇筑 MgO 混凝土不产生预压应力也没有补偿作用,因此此处可以浇常规混凝土(当然也可浇筑 MgO 混凝土)。实际上,MgO 混凝土筑坝在基础约束区所需 MgO 混凝土仅相当于坝体混凝土总量的 $1/10 \sim 1/5$,没有必要全坝都浇 MgO 混凝土。

二、坝表面保温

表面保温是 MgO 混凝土筑坝技术的重要组成部分。从 20 世纪 80 年代起,我国混凝土坝温度控制工作者已达成共识,即防止混凝土坝的表层裂缝,以坝面保温最为有效,因此,MgO 混凝土筑坝防止表层裂缝,仍要求采取坝面保温。

三、上游坝面混凝土防裂

上游坝面防裂是用 MgO 混凝土,目前没有工程实例。如上所述,MgO 混凝土产生均匀膨胀变形,在没有外部约束时,表层裂缝不能产生补偿应力。但是如果在坝表层浇筑 MgO 混凝土,内部浇常规混凝土,形成“差膨胀”约束应力,则可产生补偿应力。通仓浇筑取消纵缝的混凝土重力坝或重力拱坝,不埋设冷却水管,蓄水时坝体内部温度还很高,受水库水温“冷冲击”,坝上游面很可能产生表层裂缝,蓄水后在缝内水压作用下裂缝可能贯穿,因此,施工时可在上游面浇筑一定厚度的 MgO 混凝土,利用差膨胀防裂。

1-4 MgO 混凝土筑坝的快速施工

MgO 混凝土筑坝技术的全部社会、经济效益在于,它可以实现混凝土坝的快速施工。

传统的混凝土坝温度控制, 为了降低混凝土温度减少温度应力, 采取了许多结构上的和施工上的限制, 如柱状块浇筑, 将坝体分纵、横缝, 以缩短浇筑块尺寸, 在坝块充分收缩之后再行接缝灌浆, 使坝连成“整体”。浇筑分层不能过厚 (一般 $1 \sim 2\text{m}$), 间歇时间不能太短 (一般 $5 \sim 7\text{d}$), 以利于热量从浇筑层顶面散发。夏季浇混凝土, 为降低浇筑温度, 避开中午高温时间或者夏季停浇。所有这些都严重地限制了施工进度, 并影响大坝质量。

MgO 混凝土筑坝技术, 如不直接控制温度而是调节混凝土的变形, 上述温控的许多限制就可以相应地减少。因此 MgO 混凝土筑坝可以实行长块通仓、连续、全天候浇筑, 所导致的混凝土温度升高、温度应力加大, 可以通过调整 MgO 混凝土膨胀变形, 得以适当的补偿。这样, 不仅坝体混凝土能不开裂, 而且施工还能不受温度限制, 能够全天候、高速浇筑。

1-5 MgO 混凝土筑坝技术发展历程

我国 MgO 混凝土筑坝技术自 20 世纪 70 年代初开始研究, 并首先在白山大坝得以实现。到现在我国从东北的松花江流域到岭南的珠江流域, 利用此项技术建成的大中型混凝土坝有 $5 \sim 6$ 座, 采用 MgO 混凝土筑坝技术未用温控的坝体混凝土量累积近 300万 m^3 。此项技术的发展历程大致可分为以下三个阶段。

一、1973 年 ~ 1985 年

1973 年白山重力拱坝温控设计之初, 由于白山气候严寒, 传统温控措施难以解决大坝防裂问题, 因此作者分析了刘家峡水电站 (甘肃) 桓仁水电站 (辽宁) 等混凝土坝的原型观测成果, 从中得到启发。刘家峡采用永登大坝水泥, 坝上实测混凝土自生体积变形 (膨胀) 达 -60×10^{-6} 。桓仁采用的本溪水泥坝上实测自生体积变形膨胀达 -100×10^{-6} 。两者都接近或达到了混凝土的极限拉伸值 ($\epsilon_p = 100 \times 10^{-6}$), 数值相当可观。但本溪水泥 MgO 含量偏高, 存在着水泥安定性问题, 建工部水泥研究院 1959 年对本溪水泥厂 MgO 含量为 $4.5\% \sim 6\%$ 的水泥熟料的研究结果确认, MgO 是本溪水泥的膨胀源, 并且安定性合格, 这为白山大坝使用 MgO 混凝土筑坝提供了现实可行的依据。

此后, 进行了三年多的本溪水泥和抚顺水泥混凝土自生体积变形的室内试验。确认抚顺水泥的 MgO 具有延迟性微膨胀特性, 可提供 80×10^{-6} 膨胀变形。利用抚顺水泥可以补偿白山大坝温度应力, MgO 混凝土作为大坝防裂备用措施, 列入“白山水电站大坝混凝土及温度控制设计专题报告”中。最后白山拱坝选定抚顺水泥作为专用水泥, 并在全坝进行表面保温。与此同时开展了混凝土坝温度应力补偿理论、MgO 水泥膨胀机理和混凝土变形试验的研究。1975 年白山大坝开始浇筑混凝土, 在施工过程中进行坝上原型观测和裂缝调查。由于当时的形势, 原温控设计的降温措施均未实施, 而且有 60% 以上的基础混凝土是在夏天浇筑的, 基础温差超过 40°C , 相当于设计规范中的温差标准的一倍。1982 年蓄水前检查, 没有产生基础贯穿裂缝, 表面裂缝也很少, 基础混凝土应变计均为压应变。大坝运行至今已近 25 年 (基础混凝土已近 30 年), 没有裂缝漏水现象, 分析证实, 主要

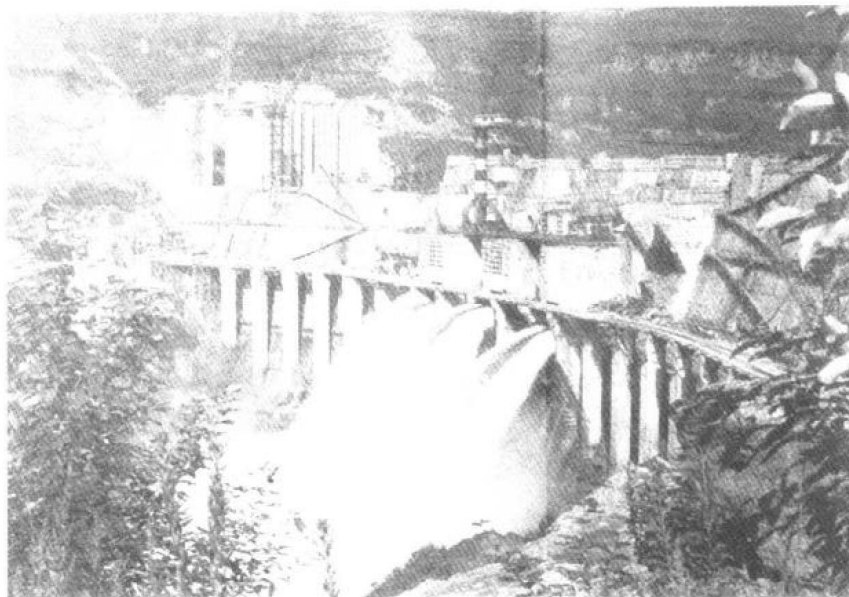


图 1-1 白山重力拱坝（吉林，坝高 149.5m，混凝土）

是抚顺水泥的微膨胀变形起了补偿作用。

因此，白山重力拱坝成为我国第一座采用水泥内含 MgO 混凝土筑坝技术的高坝。此后，1984 年施工的红石水电站的重力坝，其设计全部采用抚顺水泥，表面保温，用 MgO 混凝土取代温控措施，也取得成功。陕西安康水电站坝后厂房填塘混凝土采用抚顺水泥，效果也很好。



图 1-2 红石重力坝（吉林，坝高 54m，混凝土 30 万 m^3 ）

内含 MgO 水泥混凝土的优点是，由水泥厂控制 MgO 的质量和掺量，施工工艺更简单，

容易被人们接受。20 世纪 90 年代以后，一些科研、设计单位在研究试制这种水泥。目前葛洲坝水泥厂已正式生产氧化镁水泥。

二、1985 年 ~ 1989 年

高镁水泥由于受料源条件限制，只有少数水泥厂能够生产。为了广泛应用 MgO 混凝土筑坝技术，1985 年以后，开始“外掺” MgO 混凝土筑坝技术的研究，在 MgO 原材料制备、外掺工艺、膨胀机理、安定性控制标准、温度应力补偿理论及补偿设计等方面，进行了系统的研究。于 1987 年、1989 年两次，在浙江石塘水电站坝下游混凝土护面上，进行了外掺 MgO 现场工艺试验和实测补偿应力，取得成功。石塘现场试验表明， MgO 混凝土筑坝技术在补偿理论、材料性能以及外掺工艺的研究上日臻完善。1989 年，当时的能源部对 MgO 筑坝技术进行技术鉴定，评之为“国际领先水平”。

三、1990 年 ~ 1993 年

在广东青溪水电站大坝全坝，福建水口水电站大坝 7 号 ~ 15 号坝段中的 5 个坝段，同时推广外掺 MgO 混凝土筑坝技术。



图 1-3 青溪重力坝（广东，坝高 51.5m，混凝土 14 万 m^3 ）

青溪大坝全面采用 MgO 混凝土筑坝技术，取代温控降温措施，配合坝面保温，夏季全天候浇筑混凝土，浇筑温度超过 30°C 。施工中严格控制 MgO 混凝土的安定性、外掺 MgO 的均匀性，检验取样近 1000 个，并埋设了较多的无应力计、应变计，量测坝体混凝土的自生体积变形、温度、温度应力、补偿应力。检测结果表明， MgO 的均匀性达到良好水平，压蒸安定性合格，基础混凝土约束应力在抗拉强度范围以内，没有产生基础贯穿裂缝。1992 年蓄水，没有裂缝漏水现象。

1993 年 5 月水规总院对青溪大坝推广的 MgO 混凝土筑坝技术进行鉴定，认为此项技

术在混凝土坝上的推广是成功的，评为“国际先进水平”。因此青溪大坝是全面采用“外掺” MgO 混凝土筑坝技术的第一座大坝。

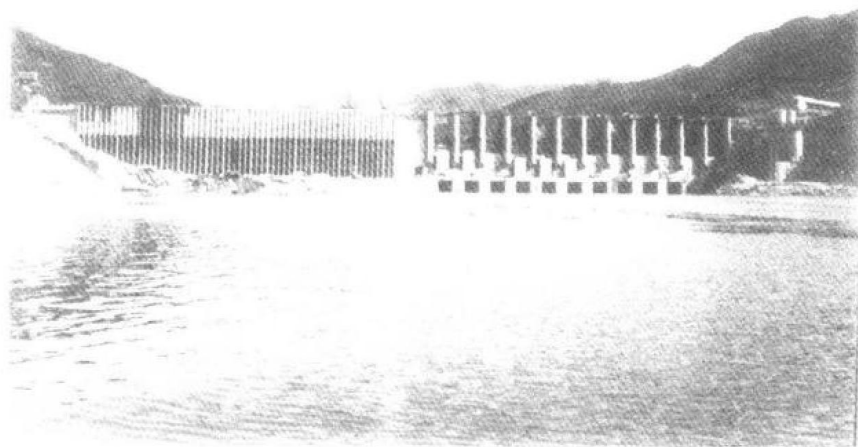


图 1-4 水口水电站（福建，重力坝，坝高 101m，混凝土 180 万 m^3 ）

水口大坝和青溪大坝一样，建在亚热带地区。由于 1990 年夏季水口工程温控降温设备不能及时投产，决定采用 MgO 混凝土筑坝技术，提高入仓温度 8°C 左右，按时浇筑基础混凝土，5 个坝段共浇筑 MgO 混凝土 9 万 m^3 左右。同样，对其进行了 MgO 混凝土安定性、均匀性检查，都达到了设计的质量要求。青溪、水口两项工程共浇筑 MgO 混凝土 12.5 万 m^3 ，折合坝体混凝土 50 万 m^3 左右。与此同时，贵州东风拱坝基础填塘也采用 1.5 万 m^3 MgO 混凝土，四川铜街子厂坝接缝回填也采用 MgO 混凝土。1995 年 ~ 1998 年修建的广东飞来峡水利枢纽，由本文编著者进行温度应力补偿设计，全面使用 MgO 混凝土，取代温度控制，现已完工。目前，国内尚有工程准备或正在采用此项技术。

MgO 混凝土筑坝技术的应用在得到推广的同时，其使用领域也在拓宽。温州珊溪面板堆石坝采用十二局科研所研制的延迟性膨胀剂，成功地防止了面板混凝土的裂缝。目前碾压混凝土坝上也在研究贫水泥混凝土利用 MgO 防裂问题。

MgO 混凝土筑坝技术的更深层次的理论问题也正在研究之中。如拱坝采用 MgO 混凝土不分缝连续浇筑的问题，浙江大学研究的 MgO 混凝土筑坝分缝接触理论及仿真计算问题，以及高掺量（ $>5\%$ ）MgO 混凝土的安定性问题等。

MgO 混凝土筑坝技术正以其固有的技术、经济优势向前发展。



第二章

混凝土坝温度应力 补偿研究

MgO 混凝土筑坝技术, 是利用 MgO 混凝土的微膨胀变形补偿大坝的温度应力, 为此, 需要分析了解混凝土坝温度场的特点, 坝体混凝土的各种体积变形、约束形式、约束应力, 以及 MgO 微膨胀混凝土对混凝土坝温度应力的补偿。

2-1 混凝土坝温度场的特点

混凝土坝施工期温度场满足热传导方程:

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

初始条件: 当 $\tau = 0$ $T = T_p$

边界条件: 当 $\tau > 0$

第一类边界条件 $T = T_b$

第三类边界条件 $-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = \beta (T - T_a)$

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$$

式中 T ——混凝土温度;

T_p ——混凝土浇筑温度;

τ ——时间;

β ——表面放热系数;

T_b ——边界温度;

T_a ——气温;

x 、 y 、 z ——坐标;

θ ——混凝土绝热温升;

α ——混凝土导温系数;

λ ——混凝土导热系数;

c ——混凝土比热；

ρ ——混凝土密度。

1. 混凝土坝施工期内部温度近于绝热状态

混凝土坝体积庞大，混凝土的导热系数低 [一般 $\lambda = 8.37 \sim 12.56 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{m})$]，坝体中心部位几乎呈绝热状态，热量一旦积聚在坝内，很难散掉，因此坝内长期保持高温。所以施工中往往分层浇筑，并采取温控降温措施，以便及早将热量散掉。

混凝土坝分层浇筑，其温度分布如图 2-1 所示。

初始温度为当时混凝土的浇筑温度 T_p ，此后混凝土发热和散热同时进行。水化热不断发散的同时，热量不断从浇筑层顶面边界向外散发，向基础传导。浇筑开始，各层温度场为浇筑层中间温度较高、层面处较低的曲线分布。5~7d 达到最高温度 T_R ，以后混凝土发热速度低于层面散热速度，温度开始下降，曲线回缩。待上层混凝土覆盖以后，本层失去顶面散热边界，热量将不再散发，接近绝热状态，只在层面附近，上层混凝土发热向下传导，热量稍有匀化，上下层之间温度曲线逐渐平顺。在基础附近热量向下缓慢传导，温度图形有一定梯度；整个高度范围逐渐形成上下分布均匀，相对稳定的准稳定场。分层浇筑时由于坝体很厚，侧面距块中心太远，接近绝热边界。

混凝土最高温度 ($T_{\max} = T_p + T_R$)，在长江流域夏季浇筑，如不采取人工降温措施，可能达到 40°C 以上。

混凝土坝温度控制的全部措施 (包括骨料预冷、拌和加冰、水管冷却等) 都是为了降低混凝土最高温度。即使如此，在整个施工期，坝体内部温度仍在 30°C 以上，一直持续到几年以后，大坝蓄水前二期冷却，人工强制降温，才能达到大坝运行期的稳定温度场 T_f (见图 2-6)。施工期坝体温度过程线如图 2-2 所示。

2. 坝体表层温度呈周期性变化

施工期大体积混凝土内部温度不受外界环境温度影响，呈相对稳定状态，已如前述。只有坝的表层一定深度范围内，混凝土温度受气温影响，做周期性变化。根据理论分析，气温影响深度只和外界气温的变化周期长短有关。

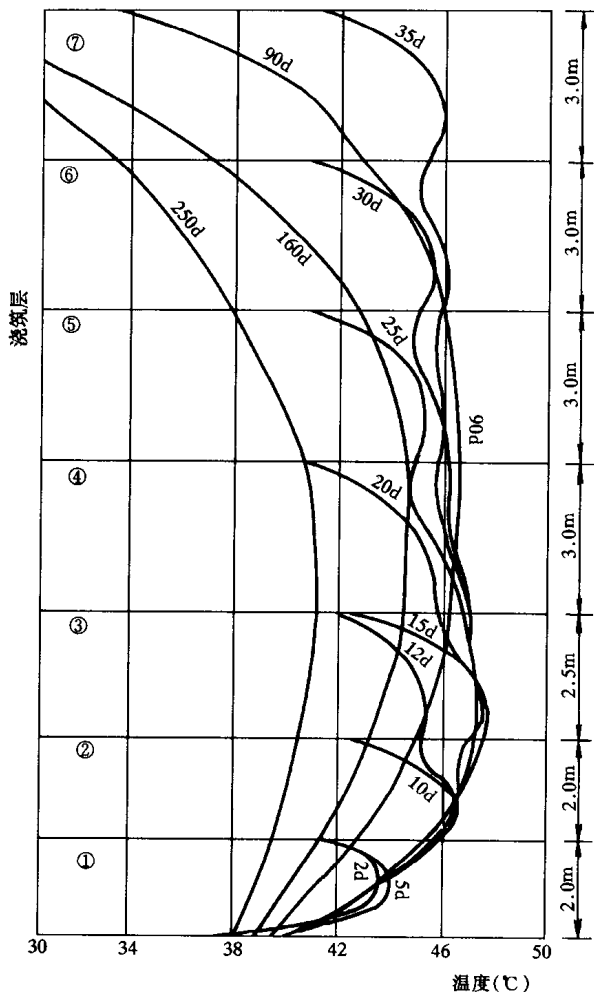


图 2-1 坝块分层浇筑温度分布图