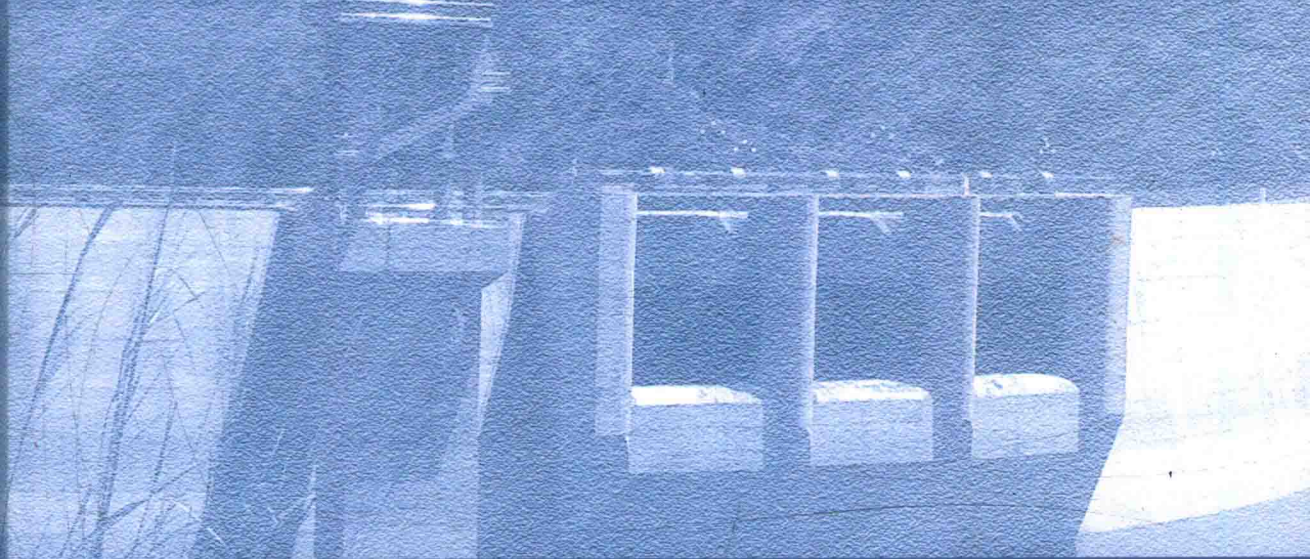




氧化镁混凝土拱坝 筑坝关键技术研究及工程实践

贵州省水利水电勘测设计研究院 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

氧化镁混凝土拱坝 筑坝关键技术研究及工程实践

贵州省水利水电勘测设计研究院 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书阐述了氧化镁混凝土拱坝筑坝技术,并以贵州省近年来已建的多座外掺氧化镁拱坝工程为例,详细介绍了氧化镁混凝土材料特性以及氧化镁混凝土拱坝设计、施工、监测等内容,对各工程温控全过程仿真成果进行了详细说明。全书对我国今后外掺氧化镁混凝土坝的建设有十分重要的参考和借鉴价值。

本书可供水利水电工程设计和建设等领域的工程科技人员参考,也可供大专院校相关专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

氧化镁混凝土拱坝筑坝关键技术研究及工程实践 /
贵州省水利水电勘测设计研究院编著. — 北京: 中国水
利水电出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5170-5127-5

I. ①氧… II. ①贵… III. ①氧化镁—混凝土坝—拱
坝—施工管理②氧化镁—混凝土坝—筑坝—施工管理
IV. ①TV642.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第326268号

书 名	氧化镁混凝土拱坝筑坝关键技术研究及工程实践 YANGHUAMEI HUNNINGTU GONGBA ZHUBA GUANJIAN JISHU YANJIU JI GONGCHENG SHIJIAN
作 者	贵州省水利水电勘测设计研究院 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874
	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京新华印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 24.25印张 575千字
版 次	2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
印 数	0001—1200册
定 价	130.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《氧化镁混凝土拱坝筑坝关键技术研究及工程实践》

编写人员名单

主 编	申献平				
副主编	杨卫中	周 伟	罗代明	向国兴	李 巍
	赵先进	兰光裕	熊 杰	张国新	李承木
编 写	杨 波	徐 江	陈昌礼	庞先明	赵其兴
	刘其文	陈大松	熊 杰	李怀斌	石 佳
	杨 强	王国香	周仕刚	徐 英	符祥平
审 稿	杨卫中	周 伟	张国新	李承木	郑国旗
	罗 恒	黄绪通	陈学茂	杨 波	方坤河
	常晓林	李 钧			

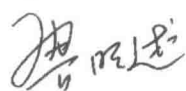
序 一

混凝土温控防裂是混凝土拱坝等工程建设的重要问题,解决此问题的传统措施是采用冷却混凝土原材料以降低出机口混凝土的温度以及埋设冷却水管通水冷却混凝土,该措施成本高,影响工程建设速度,且难以保证混凝土不出现温度应力裂缝。为了控制大坝等大体积混凝土的温度裂缝,20世纪80—90年代,我国开发了外掺氧化镁(MgO)混凝土筑坝技术,利用氧化镁水化产生的膨胀应力同步补偿混凝土的温降收缩应力,简化了大坝混凝土的施工工艺,加快了施工进度。

《氧化镁混凝土拱坝筑坝关键技术研究及工程实践》一书总结了氧化镁膨胀剂的制备技术与膨胀机理、氧化镁混凝土的制备技术和氧化镁混凝土的力学、变形、热学与耐久等性能,介绍了氧化镁混凝土安定性评价方法、氧化镁混凝土应力补偿数学模型、氧化镁混凝土筑坝仿真计算、氧化镁混凝土拱坝坝体设计方法、氧化镁混凝土生产、运输、浇筑与养护等关键施工技术以及拱坝变形等监测技术,提出了基于氧化镁补偿的拱坝分缝等设计准则、台阶式浇筑工法、辅助温控措施要求和坝体氧化镁掺量设计方法等成果。

该书总结了2001—2014年贵州省采用外掺氧化镁混凝土筑坝技术建造的沙老河、三江、鱼筒河、落脚河、马槽河、黄花寨、老江底、河湾和鱼粮等9座50~108m的混凝土拱坝的坝体设计、混凝土原材料选择、混凝土性能、大坝混凝土温度应力仿真计算、大坝混凝土施工、大坝变形监测和混凝土的微观结构。工程实践表明,电站建设采用全坝外掺氧化镁混凝土快速筑坝技术,加快了施工进度,大坝性能良好,取得了良好的技术和经济效益。通过关键技术和工程实践,制定了《全坝外掺氧化镁混凝土拱坝技术规范》(BD52/T 720—2010),丰富并完善了氧化镁混凝土筑坝技术。

该书是水利水电工程技术人员的一本有价值的参考书,对今后类似混凝土拱坝的建设具有重要的指导作用。

7


2016年11月

序 二

在混凝土坝建设中，如何防止裂缝是一个世界性的大难题，过去实际上是无坝不裂，而裂缝对大坝的危害是巨大的。大坝裂缝主要是温度应力引起的，我国学者从20世纪50年代开始，对如何防止大坝裂缝进行了大量研究，建立了混凝土坝温度应力完整的理论体系，提出了防止混凝土坝裂缝系统的工程措施，在世界上首次建成了数座无裂缝的混凝土坝，包括三峡重力坝三期工程和三江拱坝等，在世界上结束了无坝不裂的历史，在坝工技术上取得了重大成就。

普通水泥混凝土的自生变形是收缩变形。我国许多学者和贵州省水利水电勘测设计研究院的同志们做了一项有意义的工作，在拌制混凝土时外掺轻烧氧化镁，使混凝土的自生体积变形从收缩变形改变为膨胀变形，可以对混凝土坝因降温而产生的拉应力发挥补偿作用，从而减轻了混凝土坝温度控制的压力，在中小型工程中，甚至可以取消预冷骨料等温控措施。当然氧化镁混凝土只能减轻基础温差和上下层温差引起的拉应力，并不能减轻内外温差引起的拉应力，因此表面保温措施不能简化。在采用氧化镁混凝土筑坝时，还应尽量采用其他各种温度控制综合措施，单纯依靠氧化镁难以达到防止大坝产生裂缝的目的。

《氧化镁混凝土拱坝筑坝关键技术研究及工程实践》一书系统地阐述了氧化镁混凝土的材料特性及减轻混凝土温度应力的效果，并列举了大量工程应用的实例。

氧化镁混凝土筑坝系我国学者首创，在坝工技术上具有重要意义，故乐为之序。

朱伯芳

2016年11月

序 三

防止混凝土大坝产生危害性裂缝及简化大体积混凝土温度控制是坝工界长期以来十分关注的问题。在刘家峡重力坝和白山拱坝多年运行后未发现有害裂缝的实况出现后,我国的科技专家揭示出:混凝土所用水泥中含有一定量的氧化镁,可具有延迟微膨胀特性,对补偿混凝土应力或防止产生裂缝十分有利,是一种潜在的辅助温控技术因素。

20世纪80年代,一些高校、科研与设计单位的科技专家们开始重视氧化镁技术的运用,先后在研发延迟微膨胀变形特性及其对大体积混凝土温度收缩的补偿效应等方面,展开了全方位的探索与研究,研究成果增强了应用氧化镁建造混凝土拱坝的信念,90年代进一步实现了应用氧化镁混凝土建造拱坝的期盼。

贵州省水利水电勘测设计研究院的工程师们为了进一步推动这一技术的发展和实现更加广泛的有效应用,从21世纪初开始,就以坚定的态度、求实的精神、实干的步伐,以建成多个氧化镁混凝土拱坝为目标,坚持不懈地开展了10多年的探索研究和工程实践。在每一项拱坝工程设计和施工建设过程中,都结合工程特点开展了有针对性的材料、结构、温度应力、施工技术等方面的专项研究分析,以确保工程的顺利完成。

关于采用氧化镁混凝土技术筑坝问题,在坝工界存在着不同的认识,其中:一是疑虑国内市场上的氧化镁材料品质参差不齐,其均匀性、稳定性往往不易保证,甚至达不到基本技术要求,对工程质量的影响令人担心;二是目前大多数氧化镁混凝土微膨胀在浇筑后较早龄期就很快完成,后龄期的延迟膨胀量已所剩不多,其收缩补偿作用虽依然在发挥功效,而其有效性已被明显减弱,因此在工程应用时,需对各种技术特性进行严谨的综合分析评估。

贵州省水利水电勘测设计研究院在建坝过程中,对这些问题和疑虑给予了关注,进行了相应的研究,也有一定的措施。值得指出的是,设计院的研发专家们没有孤立地应用氧化镁混凝土收缩补偿功能,他们把拱坝合理分缝,密切结合当地气温条件,合理安排关键部位混凝土的浇筑季节,以形成坝体更加有利的温度场和坝体应力场,使坝体获得更加有效的抗裂、防裂性能,这种组合效应是合理运用氧化镁混凝土修筑拱坝的重要内涵。

在筑坝研究过程中将外掺氧化镁技术应用到两座碾压混凝土拱坝工程的尝试很有意义，或将对改善坝体温度应力有辅助作用，值得探索 and 关注。

《氧化镁混凝土拱坝筑坝关键技术研究及工程实践》一书将实际建成的 9 个混凝土拱坝工程的丰富科研成果、工程实效与成功经验总结、提炼并贡献给读者，确实为进一步开拓和发展氧化镁混凝土拱坝筑坝技术提供了一份厚重的技术铺垫，也增加了该项技术向前发展的推动力。



2016 年 11 月

前 言

进入 21 世纪以来,随着经济的蓬勃发展,我国高拱坝发展方兴未艾,一系列高拱坝的相继建成,将混凝土拱坝从高度 100m 级高度提高至 300m 级,工程规模也越来越大,对经济社会发展产生了重要的作用。但从工程技术角度来讲,对混凝土开裂控制的要求及技术难度也越来越高。

氧化镁筑坝技术主要起源于国内工程实践,是国内外筑坝技术的重大突破和创新。该技术主要利用氧化镁的延迟微胀性,减少和消除混凝土在降温过程中产生的拉应力和体积收缩,从而防止混凝土产生裂缝。由此可以减少并取代大部分传统混凝土温控措施,施工工艺简单、经济、快速。

国外较早将氧化镁作为水泥中的不安全因素进行了研究。Lea 首次提出了氧化镁含量过高会引起水泥安定性不良的问题。德国 Cassel 市政大楼由于其水泥中氧化镁含量 27% 最终导致被破坏。1980 年, Metha 与 Pirtez 尝试利用氧化镁水化膨胀来补偿混凝土在降温收缩过程中产生的拉应力,但其研究成果一直局限于室内实验,未用到工程实践中。

应用氧化镁混凝土筑坝的研究起源于 1982 年吉林白山重力拱坝的修建。该坝在浇筑过程中混凝土基础温差相差约 40℃, 远超温度控制要求,但在随后的蓄水、运行过程中未发现明显渗透漏水情况,后经研究发现该工程使用的是氧化镁含量较高的抚顺水泥,氧化镁的微膨胀性改善了混凝土的开裂情况。1989 年后,外掺氧化镁混凝土逐渐应用于水利水电工程建设。1995 年颁布了《MgO 微膨胀混凝土筑坝技术暂行规定》,进一步推动了氧化镁混凝土在我国大坝工程中的应用,但在暂行规定中注明了该规定不适用于拱坝。1999 年广东省的长沙坝,是我国第一座全坝使用氧化镁混凝土浇筑的拱坝,该坝的建设开启了氧化镁混凝土应用于拱坝的先河。

当前我国外掺氧化镁混凝土拱坝共 15 座,主要集中于广东与贵州。2001 年贵州省建设的沙老河坝对全坝外掺氧化镁混凝土拱坝筑坝技术的发展起到了重要作用。该坝于 2001 年 3 月开浇,10 月浇筑到顶,未设置伸缩缝和止水,当年 11 月在坝体两端发现裂缝,其原因是在贵州的气候条件下,混凝土中氧化镁产生的膨胀效应不足以补偿混凝土收缩。以沙老河拱坝建设经验为基础,贵州三江拱坝于 2003 年建成,该坝选取低温季节浇筑,两坝端各设置

一条诱导缝，并适当提高了混凝土中氧化镁的掺量，大坝建成后于当年蓄水，至今运行正常，无明显温度裂缝。在总结沙老河拱坝与三江拱坝建设经验的基础上，贵州省运用外掺氧化镁混凝土技术先后建成了落脚河拱坝、马槽河拱坝、老江底拱坝、鱼筒河拱坝、黄花寨拱坝等项目，并出台地方标准《全坝外掺混凝土拱坝技术规范》(BD52/T 720—2010)，用于指导和推广外掺氧化镁混凝土在拱坝上的应用。当前全坝外掺氧化镁混凝土筑坝技术已发展至百米级，并与碾压混凝土技术相结合，可进一步发挥其经济、快速的筑坝优势。经过30多年的理论基础研究及工程实践应用，目前我国在氧化镁混凝土的材料性能、应力补偿、温控仿真和施工等方面已形成了一整套理论和技术体系，应用氧化镁混凝土的筑坝技术已处于世界领先地位。

本书分为上、下两篇，上篇为氧化镁混凝土拱坝筑坝关键技术，从氧化镁混凝土材料特性、氧化镁混凝土拱坝设计、施工、监测等方面对氧化镁混凝土拱坝筑坝技术做了系统介绍；下篇为氧化镁混凝土拱坝筑坝技术工程应用，收集了贵州近年来已建的多座外掺氧化镁混凝土拱坝工程实例，对各工程枢纽情况、拱坝和氧化镁混凝土应用设计以及温控全过程仿真进行了详细介绍。这些对我国今后外掺氧化镁混凝土坝工程建设有着十分重要的参考和借鉴价值。

尽管作者在本书编写过程中作出了很大的努力，但由于知识和工程经验的局限，书中仍难免存在错漏和不妥之处，欢迎广大读者提出宝贵的意见和建议。

作 者

2016年11月

目 录

序一	
序二	
序三	
前言	

第1章 绪论	1
1.1 全坝外掺氧化镁混凝土拱坝技术特点和优势	1
1.2 全坝外掺氧化镁混凝土筑坝技术的发展	2
1.3 全坝外掺氧化镁混凝土拱坝应用技术的展望	4

上篇 氧化镁混凝土拱坝筑坝关键技术

第2章 氧化镁混凝土材料特性及微观机理分析	9
2.1 氧化镁膨胀剂的制备	9
2.2 氧化镁的膨胀机理	10
2.3 氧化镁混凝土的制备	11
2.4 氧化镁混凝土的力学性能	13
2.5 氧化镁混凝土的变形性能	14
2.6 氧化镁混凝土的热学性能	16
2.7 氧化镁混凝土的耐久性能	17
2.8 氧化镁混凝土的安定性判断	18
2.9 氧化镁混凝土性能的影响因素	26
第3章 氧化镁混凝土拱坝温控和仿真分析方法	32
3.1 混凝土坝温度场的有限元计算方法	32
3.2 考虑混凝土徐变效应的温度应力场计算方法	36
3.3 氧化镁混凝土微膨胀性应力补偿数学模型	40
3.4 氧化镁混凝土筑坝仿真技术	44
第4章 氧化镁混凝土拱坝设计	48
4.1 概述	48
4.2 枢纽布置	49
4.3 拱坝体形设计	49
4.4 应力分析	50

4.5	坝体氧化镁补偿设计	53
4.6	坝体分缝	56
4.7	其他温控措施	59
4.8	施工组织设计	60
第5章	氧化镁混凝土拱坝施工关键技术	61
5.1	氧化镁混凝土拱坝浇筑特点	61
5.2	氧化镁混凝土原材料质量控制	62
5.3	氧化镁混凝土生产及氧化镁均匀性检测	62
5.4	氧化镁混凝土运输及入仓	67
5.5	氧化镁混凝土的浇筑	69
5.6	横缝和诱导缝成缝工艺	74
5.7	氧化镁混凝土养护	75
5.8	温控措施	76
5.9	灌浆工艺	78
5.10	施工质量管理控制	79
第6章	氧化镁混凝土拱坝监测技术	82
6.1	安全监测设计	82
6.2	监测实施	90
6.3	观测与资料整编分析	91

下篇 氧化镁混凝土拱坝筑坝技术工程应用

第7章	沙老河水库拱坝	101
7.1	引言	101
7.2	工程概况	102
7.3	拱坝体形设计	103
7.4	材料研究及试验	104
7.5	大坝混凝土施工	109
7.6	大坝安全监测	111
7.7	坝体裂缝及原因分析	113
7.8	大坝裂缝处理及运行情况	120
7.9	结语	124
第8章	三江拱坝	125
8.1	引言	125
8.2	枢纽布置	125
8.3	拱坝体形设计	126
8.4	应力分析	127
8.5	三江拱坝外掺氧化镁温控全过程仿真	129

8.6	筑坝材料研究与应用	146
8.7	大坝混凝土施工	152
8.8	考虑分缝和掺氧化镁后应力复核	157
8.9	拱坝蓄水运行情况	159
8.10	结语	162
第9章	鱼简河拱坝	163
9.1	工程概况	163
9.2	枢纽布置	163
9.3	拱梁分载法计算分析	165
9.4	仿真计算	167
9.5	坝体碾压混凝土的研究	184
9.6	大坝碾压混凝土施工	187
9.7	原型监测	189
9.8	大坝无损检测及芯样试验	194
9.9	结语	196
第10章	落脚河水电站拱坝	197
10.1	概述	197
10.2	枢纽布置	197
10.3	拱坝体形设计	198
10.4	拱坝外掺氧化镁全过程仿真分析	200
10.5	筑坝材料研究与应用	216
10.6	大坝混凝土施工	224
10.7	拱坝监测及蓄水运行情况	226
10.8	结语	230
第11章	马槽河拱坝	232
11.1	概述	232
11.2	拱坝设计	233
11.3	仿真分析计算	235
11.4	外掺氧化镁微膨胀混凝土配合比试验	240
11.5	坝体施工	247
11.6	安全监测	250
11.7	水库运行情况	251
11.8	结语	255
第12章	黄花寨拱坝	256
12.1	概述	256
12.2	枢纽布置	257

12.3	拱坝设计	258
12.4	材料研究和试验	261
12.5	仿真分析与温控	264
12.6	大坝施工	274
12.7	大坝安全监测	276
12.8	大坝无损检测及芯样试验	280
12.9	结语	283
第 13 章	老江底拱坝	284
13.1	概述	284
13.2	枢纽布置	284
13.3	拱坝体形设计	286
13.4	采用氧化镁混凝土的应用研究	288
13.5	仿真计算	291
13.6	氧化镁混凝土施工	302
13.7	原型监测及检测	304
13.8	结语	305
第 14 章	河湾拱坝	306
14.1	工程概况	306
14.2	拱坝体形设计	307
14.3	筑坝材料	309
14.4	仿真计算	312
14.5	大坝安全监测	315
14.6	结语	318
第 15 章	鱼粮拱坝	319
15.1	概述	319
15.2	枢纽布置	320
15.3	拱坝设计	320
15.4	混凝土材料选择及施工配合比	322
15.5	仿真分析	325
15.6	大坝施工	333
15.7	安全监测	336
15.8	结语	340
附录	DB52/T 720—2010《全坝外掺氧化镁混凝土拱坝技术规范》	341
参考文献		371
后记		373

第1章 绪 论

1.1 全坝外掺氧化镁混凝土拱坝技术特点和优势

混凝土拱坝结构断面尺寸一般较大,属大体积混凝土结构。从结构受力特点来讲,拱坝属超静定结构,不仅坝基受到约束,在两侧坝肩同样受到约束,结构受力较为复杂。同时,混凝土拱坝通常是不配钢筋的,一般主要在坝身孔洞附近配置少量钢筋,与其巨大的断面相比,其断面的配筋率是极低的。在钢筋混凝土结构中,拉应力主要由钢筋承担,混凝土只承受压应力;在混凝土拱坝中,由于未设置钢筋,拉应力只能依靠混凝土本身来承受。而混凝土是脆性材料,抗拉强度较小,只有抗压强度的 $1/10$ 左右;拉伸变形能力也较小,短期加载时的极限拉伸变形只有 $(0.6\sim 1.0)\times 10^{-4}$,长期加载时的极限拉伸变形只有 $(1.2\sim 2.0)\times 10^{-4}$ 。

拱坝无论在施工期还是运行期,均置于大气环境中,其表面与空气或水接触,受水泥水化热、大气温度、日照、水温等影响,坝体温度实际上始终处于变化的过程中。坝体的温度场与当地的气候条件、施工过程、材料特性及运行条件等多种因素有密切关系。

混凝土拱坝开始浇筑后,由于水泥的水化热,内部温度急剧上升,此时混凝土弹性模量较小、徐变较大,升温引起的压应力不大,但在日后温度逐渐降低时,弹性模量较大、徐变较小,降温将会引起较大的拉应力。同时,混凝土冷却过程中,表面温度较低,内部温度较高,如果再遭受寒潮的影响,将使得结构内部温度呈高度非线性分布,表面的温度收缩变形将受到内部的约束,使得表面出现拉应力,而内部出现压应力。如果施工期或者运行期由于温度作用产生的坝体温度应力较大,则可能超过引起坝体裂缝。

混凝土拱坝的裂缝是工程界非常关心的问题,也是长期以来没有解决的问题。拱坝的裂缝会破坏坝体的整体性,对坝的安全性造成不利影响。一般拱坝的裂缝多数是由于坝体混凝土水化升温后的温降收缩受到约束而产生。传统的解决方法是减小约束、降低温差和提高混凝土的抗裂性能。长期的实践证明,传统的方法对减少裂缝是有效的,但存在施工复杂、工期长的问题,不利于工程尽早发挥效益。氧化镁混凝土筑坝技术将传统的通过控制混凝土温度的措施转化为通过控制大坝混凝土自身变形的措施,从而达到控制混凝土开裂的目的。该技术可以使传统混凝土坝的温控措施大部分甚至全部取消,实现经济、快速的筑坝效果。

氧化镁混凝土筑坝技术主要起源于国内工程实践,是国内外筑坝技术的重大创新和突破。其主要技术特点可归纳如下:

(1) 基本理论。利用氧化镁 (MgO) 独特的延迟性微膨胀变形来补偿混凝土坝的收缩和温度变形,以防止产生裂缝。最理想的膨胀发生时间应在水化热的最高温升之后、在混凝土有显著降温之前。换句话说,就是通过延迟性微膨胀造成一种预压应力来抵消混凝土冷却收缩时产生的拉应力。



(2) 防裂原理。传统的混凝土坝裂缝控制方法,是采取多种温控措施来控制筑坝过程的温差,使混凝土温度产生的拉应力控制在允许的范围内,以达到防裂的目的。而外掺氧化镁混凝土筑坝,则是通过控制大坝混凝土的体积变形,以达到大坝防裂的目的。

(3) 实现方法。氧化镁混凝土筑坝技术是通过在生产大坝混凝土时加入适量的、特制的轻烧氧化镁来实现的。这个掺量在满足压蒸安定性的前提下,使混凝土尽可能达到温控设计的膨胀量。通过外掺氧化镁和优选水泥品种,并加强大坝表面保温,可以得到比较理想的自生体积膨胀变形过程线。

(4) 施工技术。传统筑拱坝施工方法包含分缝分块、柱状薄层浇筑、封拱灌浆等,施工工艺十分繁杂,各种工序干扰大,温控费用昂贵(通常为工程总投资的4%~6%),很难做到快速施工。氧化镁筑拱坝施工方法不分横缝或设少量诱导缝,以释放过大、超标的拉应力,同时分层通仓浇筑、以台阶法连续滚动推进,不埋冷却水管,可全天候施工,极大地加快了施工速度。氧化镁筑坝方案与常规筑坝大体相同,主要施工设备基本一致,无需增加专用施工机械设备,一般多采用垂直与水平运输合二为一的施工方案。其关注重点是,施工中必须严格控制外掺氧化镁的均匀性、准确的拌和时间及稳定的坍落度。

(5) 使用条件。基本要求是外掺氧化镁后的水泥强度等级不降低,压蒸安定性合格。有约束条件的工程部位均可使用该技术。在全国各地全面推广使用还应满足温度应力应变补偿条件。

(6) 自变特性,氧化镁混凝土自生体积膨胀变形具有延迟性和长期稳定性,即主要膨胀量均发生在水化热最高升温之后、混凝土显著的降温收缩之前,其后期的膨胀变形逐渐趋于长期稳定状态,不会发生无限膨胀。另外,温度对自变量的影响较大,不同温度下的自生变形量的最终稳定值各异。此外,混凝土膨胀量的大小与氧化镁的特性及掺量、混合材种类与掺量及配合比组成等诸多因素有关。

碾压混凝土筑坝技术也是现代筑坝新技术之一,施工速度较快,但需要专门的碾压机械设备,对于薄拱坝或倒悬度大的拱坝来说其适应性稍差。然而,采用全坝外掺氧化镁混凝土拱坝技术建拱坝也可以达到较快的速度。与碾压混凝土筑坝技术相比,该技术对中小型拱坝(坝体方量小于20万 m^3)适应性更强。在碾压混凝土中外掺氧化镁,能做到夏季继续施工,进一步加快施工速度,放宽允许浇筑温度,增大诱导缝间距,改善混凝土质量,提高坝体抗渗能力,增强坝体的耐久性能。

全坝外掺氧化镁混凝土拱坝技术是指从改善混凝土性能入手进行研发的一种崭新的实用技术,该技术是集材料、结构设计、施工为一体的综合技术,包含了混凝土材料的热学、力学和变形性能、混凝土温度应力补偿设计、氧化镁混凝土施工控制、坝体原型观测等方面的内容。

1.2 全坝外掺氧化镁混凝土筑坝技术的发展

我国对氧化镁混凝土的研究起源于20世纪80年代吉林省建成的白山重力拱坝。该工程基础坝段65%的混凝土最高温度高达 50°C ,基础温差普遍高于 40°C ,远高于当时的温度控制标准。工程蓄水运行后,基础并无贯穿性裂缝。后来研究发现,主要原因是白山重



力拱坝使用了具有微膨胀性的抚顺水泥混凝土,其膨胀量补偿了混凝土收缩,减少了大坝裂缝的产生。成都勘测设计研究院科研所和南京化工学院通过室内实验及机理研究表明,抚顺水泥氧化镁含量高达5%,属于高镁配方;氧化镁水化速度较慢,在水化后生成的氢氧化镁晶体使混凝土体积膨胀,这种延迟微膨胀在混凝土降温过程中补偿了收缩变形,从而达到了防裂的目的。

氧化镁混凝土筑坝技术发展历程可以概括为三个阶段。

第一个阶段(1975—1989年),从室内试验研究到中间试验性应用。这期间开展了大量的实验研究工作,并在1981年向当时的能源部水利部水利水电规划设计总院(以下简称水规总院)进行了汇报,水规总院给予了肯定和支持,并拨款给南京化工学院对机理作进一步分析,同时列为水规总院的科研项目。当时的结论是,通过总结工程实践,再经过室内验证,得出并发现了很有研究价值的课题。水规总院分别于1984年、1985年在北京和南京召开了“MgO微膨胀混凝土座谈会”和“水泥膨胀剂学术讨论会”。

自白山重力拱坝后,对于氧化镁混凝土能够通过自生体积膨胀补偿混凝土收缩时产生的拉应力已达成共识,但对于氧化镁混凝土的自生体积膨胀是否会对混凝土强度造成影响、外掺氧化镁是否会产生二次体积膨胀等问题并没有一个明确的定论。在水规总院于1985年在南京召开的“水泥膨胀剂学术讨论会”上,成都勘测设计研究院根据氧化镁混凝土长期力学及变形特性的试验研究结果指出,混凝土在氧化镁掺量合理的条件下,氧化镁混凝土自生体积膨胀是稳定的、不可逆的,不会发生无限膨胀,膨胀对混凝土强度的影响不大,且外掺氧化镁混凝土不会产生二次膨胀;南京化工学院对氧化镁混凝土的微观研究也说明,氧化镁水化反应是一次性逐渐发生的,水化产物是稳定的。这次会议的成功召开,改变了氧化镁是水泥的有害成分这一传统观念。试验成果解答了人们的疑问,打消了人们的担心和疑虑。在这次研讨会议上,由水规总院挂帅正式成立了“延迟性微膨胀水泥的研制及应用”课题科研组,加速了氧化镁课题的研发工作。之后,水规总院又于1988年、1989年在贵阳召开了“外掺MgO混凝土研究与应用协调会”,并审查了石塘、东风两个工程实施氧化镁混凝土的设计方案以及现场试验大纲。这次会议对发展外掺氧化镁混凝土筑坝技术推动很大,影响深远。从1987年起,课题组先后在东风下游重力围堰、石塘下游护坦、铜街子大坝明渠右导墙做了外掺氧化镁混凝土的现场试验,均获得了成功。经过10余年的室内基础理论研究和1987—1989年的中间试验,取得了丰硕的室内外研究成果,在氧化镁水化膨胀机理、混凝土长期变形性能、温度应力补偿、均匀性检测、施工工艺控制等方面的研究深度和广度均超过了国外的已有成果。能源部于1989年9月22—23日在贵阳召开鉴定会,通过了部级技术鉴定,认为该项科研成果达到国际领先水平。该项目于1989年被列为“八五”国家电力工业新技术重点推广项目,为氧化镁混凝土在水利水电工程的推广运用奠定了基础。

第二个阶段(1990—1998年),科研成果鉴定后的推广应用阶段。我国氧化镁混凝土筑坝技术快速提升,该技术先后应用到10余座大中型水电站的不同工程部位,包括重力坝基础约束区、导流洞封堵工程、堆石坝面板、碾压混凝土坝基础约束区等。在1995年,水电水利规划设计总院和水利水电规划设计总院联合发布了《关于颁发〈MgO微膨胀混凝土筑坝技术暂行规定(试行)〉的通知》。暂行规定的颁布和多个工程上的成功运用,进一