

外掺 MgO 微膨胀混凝土筑坝技术应用综述

李承木¹, 袁明道²

(1. 国家电力公司成都勘测设计研究院, 四川 成都 610071; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610)

摘要: 对外掺 MgO 混凝土筑坝技术的理论、特征, MgO 混凝土筑坝技术的实践形成及发展过程, 以及在我国 30 余个工程中的应用情况、应用效果和所取得的技术经济效益等方面进行概述。同时也对不分横缝快速筑拱坝技术应用的全面研究情况作了扼要介绍。指出在实施 MgO 混凝土筑坝的过程中, 为了确保质量, 必须高度重视的技术问题。

关键词: MgO 混凝土; 微膨胀; 筑坝技术; 综述

中图分类号: TV431+.9; TU528.55

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2003)06-0057-07

MgO 混凝土筑坝技术是指在生产大坝混凝土时加入适量特制的轻烧 MgO, 利用其特有的延迟微膨胀性能补偿混凝土的收缩和温度变形, 以防止混凝土产生裂缝。也就是利用 MgO 水化所释放的化学能转变为机械能, 使混凝土产生自生体积膨胀, 抵消其温降过程的体积收缩。更确切地说, 就是利用混凝土的限制膨胀来补偿混凝土的限制收缩, 以解决大坝混凝土的抗裂问题。其主要特征是, 把传统的通过预冷降低筑坝温度的办法, 改为调节控制大坝混凝土的体积变形, 以达到大坝防裂的目的。MgO 混凝土筑坝技术是大体积混凝土施工的革命, 是国内外筑坝技术的重大创新和突破。

采用 MgO 混凝土, 辅以其他适当措施, 可以做到全部或部分取代传统的混凝土坝温控措施, 这不仅有利于解决混凝土坝的开裂问题, 而且可以降低工程造价, 简化施工工艺, 缩短工期, 因此具有重大的技术经济优势和应用发展前景。

MgO 混凝土筑坝技术, 不仅在重力坝基础约束区、碾压混凝土坝的垫层垫座及上游防渗体、大坝基础填塘、导流洞封堵、高压管道外围回填等工程部位成功应用, 而且在中型薄拱坝的全坝段上也已成功使用。近年来的实践已发展到对不分横缝快速筑拱坝技术应用的全面研究。

MgO 微膨胀混凝土筑坝技术, 经过 10 余年室内基础试验研究, 以及在石塘电站护坦、铜街子电站主坝、东风电站重力围堰作外掺 MgO 混凝土的现场试验, 取得了丰硕的研究成果, 该项成果于 1989 年 9

月在贵阳通过能源部组织的部级技术鉴定。鉴定认为, 该研究成果的实施, 不仅可以简化温控措施, 有效防止基础裂缝, 而且可以缩短工期, 具有显著的经济效益和社会效益, 是一项加快水利水电工程建设的有效措施。此项研究, 在国外目前仅有少量的室内试验结果, 我国现在已经在工程实践中取得了初步的成果, 具有国际领先水平。

为了更好地推广应用和发展 MgO 混凝土筑坝新技术, 对已采用过 MgO 混凝土筑坝技术施工的工程进行实事求是的总结, 得出可供参考和借鉴的施工经验, 使 MgO 混凝土筑坝技术在水利水电工程中得到更广泛的应用, 对加快我国水利水电工程建设, 具有十分重要的现实意义。

1 MgO 混凝土现场实验^①

1.1 内含 MgO 水泥的应用实践

20 世纪 70 年代在东北严寒地区修建的白山电站重力拱坝, 在基础温差普遍超过 40℃ 的情况下, 没有产生基础贯穿性裂缝, 表面裂缝也很少, 大坝自 1982 年蓄水至今没有漏水现象。从原型观测中发现, 白山大坝混凝土具有微膨胀性能, 对减少大坝的温度裂缝具有明显的效果。后经大量实验研究证明, 白山电站采用的抚顺大坝水泥中 MgO 含量较高, MgO 水化产生膨胀是白山大坝裂缝较少的根本原因。在 1984 年 12 月北京会议上, 原水电总局确认了“抚顺水泥具有延迟性膨胀, 对白山电站大坝基础混凝土温降收缩起了补偿作用, 方镁石是该水泥具有

作者简介: 李承木(1939—), 男, 四川内江人, 教授级高级工程师, 从事工程材料科学试验及 MgO 混凝土筑坝技术研究。

^① 电力工业部, 水利部, 水利水电规划设计总院. 氧化镁混凝土筑坝技术文集. 1994.

膨胀性的主要原因”。为验证抚顺水泥的膨胀作用,1986年在白山电站下游的红石电站重力坝,全部采用内含高镁抚顺大坝水泥施工,取消了温控措施,未采用降温措施,也取得同样效果,这就进一步肯定了MgO微膨胀混凝土的补偿作用。

白山和红石电站大坝所用的抚顺大坝水泥是内含MgO的水泥,1985年以后我国开始着手研究外掺MgO混凝土筑坝技术,并陆续在一些工程中试验应用。

1.2 外掺MgO混凝土的现场试验

1987年8月,在浙江石塘电站下游护坦首次作外掺MgO混凝土现场试验,浇MgO混凝土约150m³,现场实测MgO混凝土的有效自生体积膨胀变形量为80×10⁻⁶,不掺MgO混凝土的自生体积变形则是收缩的,通过现场试验,基本解决了外掺工艺问题,达到了预期目标。1989年4月,在石塘电站护坦又作了第二次现场试验,浇MgO混凝土约230m³,通过试验解决了MgO均匀性的检测方法问题。1989年1月,在四川铜街子电站明渠右导墙坝段上,作了外掺MgO混凝土现场试验,外掺4%MgO,浇MgO混凝土

60m³,实测无应力计的有效膨胀量为50×10⁻⁶左右,所埋的测缝计是闭合的。未掺MgO的普通混凝土的自生体积变形是收缩的,测缝计也是张开的。1989年4月,又在贵州东风电站下游重力围堰作外掺MgO混凝土现场试验,该围堰堰顶长75m,最大堰高25m,底宽22m,外掺MgO为2.5%~2.9%,在基础约束区6m内通仓连续浇筑MgO混凝土1572m³,无应力计观测MgO混凝土90d的膨胀变形量达到(80~130)×10⁻⁶,最终自生体积变形稳定在(100~140)×10⁻⁶之间,所埋测缝计受压是闭合的。这是当时浇筑MgO混凝土方量最多,膨胀变形量最大的一次现场试验。如果将该围堰视为一小型重力坝,那么,这就是外掺MgO混凝土筑坝的首次突破与成功应用。

2 MgO微膨胀混凝土筑坝技术在工程中的应用

外掺MgO微膨胀混凝土用于各工程的自生体积变形(C(t))和施工情况分别见表1和表2。

表1 各工程使用MgO混凝土的自生体积变形

序号	工程	混凝土标号	水泥		水胶比	砂率/%	胶材用量/(kg·m ⁻³)		级配	MgO掺量/%	自生体积变形C(t)/10 ⁻⁶						
			品种	标号			水泥	粉煤灰			3d	7d	30d	90d	180d	365d	730d
1	白山(基础)	R ₂₅ ^o	抚顺大坝	525	0.47	20.5	206	—	4	内含4.28	8.0	10.3	7.2	10.2	14.9	23.8	34.6
2	白山(内部)	R ₂₀ ^o	抚顺矿渣	425	0.53	21.5	191	—	4	内含4.38	7.2	11.8	29.5	54.5	64.9	79.6	92.2
3	石塘	R ₂₀ ^o	江山普硅	525	0.55	22.5	180	45	3	4.4	10.6	21.0	30.0	40.0	56.0	80.0	
4	铜街子	R ₂₅ ^o	略阳低热	425	0.54	41	290	—	2	4.5	192.4	181.6	207.5	230.0	236.3	237.4	240.0
5	东风	R ₃₀ ^o	贵州硅酸盐	525	0.50	22	129	55	4	3.5	15.4	29.0	55.0	98.8	112.7	121.0	
6	青溪(基础)	R ₁₅ ^o	文福普硅	425	0.60	25	150.5	64.5	4	2~5	21.0	38.0	76.6	92.9	99.8	114.4	
7	青溪(内部)	R ₁₀ ^o	文福普硅	425	0.75	28	120.4	51.6	4	5.0	18.0	32.0	64.7	92.2	95.5	100.0	
8	水口	R ₂₅ ^o	顺昌硅酸盐	525	0.55	22.3	123	41	4	4.4~4.8	20.0	34.2	64.0	84.0	93.0	99.0	
9	普定	R ₂₀ ^o	贵州硅酸盐	525	0.55	26	95	78	3	3.2	25.3	35.4	58.5	66.7	70.0	80.0	
10	东西关	R ₂₀ ^o	合川普硅	425	0.49	17	117	78	3	4.0	12.8	27.0	50.1	53.8	55.8	70.0	
11	铜头(基础)	R ₂₀ ^o	夹江中热	425	0.65	23	129.6	32.4	4	3.0	11.0	14.1	20.0	24.0	32.4	45.0	51.0
12	铜头(左导流洞)	R ₂₅ ^o	夹江中热	425	0.45	40	273	82	2	5.0	24.4	48.6	77.2	88.1	101.0	112.0	122.0
13	飞来峡	R ₂₀ ^o	英德普硅	425	0.60	24.5	142.3	61	4	1.75~3.5	15.8	32.0	68.5	75.0	95.0	114.0	
14	龙潭	R ₂₅ ^o	白花普硅	425	0.58	42	365	—	2	4.5	23.0	42.3	53.0	55.2	71.0	84.9	110.0
15	黄兰溪	R ₂₅ ^o	宁国硅熟料	425	0.45	38	315	50	2	3~4	18.0	31.0	49.0	66.0	85.0	95.0	
16	二滩	R ₁₅₀ ^o	渡口硅酸盐	525	0.45	44	230	99	2	2.6~3	12.6	22.0	31.0	54.0	60.0	66.0	
17	花滩	R ₂₀ ^o	夹江普硅	425	0.61	22	135.8	47.5	4	3.5	7.5	19.5	22.5	31.5	50.0	70.3	96.0
18	花滩(防渗体)	R ₂₀ ^o RCC	夹江普硅	425	0.50	36	118	118	2	3.5	5.3	13.2	16.0	22.0	32.0	40.0	50.0
19	红叶I级	R ₂₅ ^o	夹江硅酸盐	425	0.46	45	365	—	1	5.0	24.0	48.0	77.0	78.0	85.0	98.0	118.1
20	莲花	R ₂₅ ^o	略阳低热	425	0.55	46	305	—	1	4.5	232.2	248.0	253.2	245.5	240.0	240.0	
21	莲花	R ₂₅ ^o	略阳低热	425	0.55	30	204	—	3	4.5	197.4	210.8	212.2	208.7	204.0	200.0	
22	黑土坡	R ₂₅ ^o	夹江普硅	425	0.50	41	340	—	2	5.5	27.8	44.9	74.5	96.4	119.0	143.0	
23	长沙	R ₂₀ ^o	云浮金鹰	525	0.49	27	145	60	3	3.5~4.5	16.0	26.0	72.0	100.0	133.0	148.0	168.2
24	沙牌(垫层)	R ₂₀ ^o	白花中热	425	0.54	29	136.5	73.5	3	2.6~3.1	30.2	44.5	68.6	97.6	120.0	125.3	
25	沙牌(垫座)	R ₂₀ ^o	白花中热	425	0.517	34	89	89	3	2.6~3.1	29.8	43.4	60.5	87.5	90.0	100.0	

注:水泥品种一栏中,“普硅”即“普通硅酸盐”(下同)。

表 2 MgO 混凝土在工程中的应用情况

序号	使用时间	电站名称	建设地点	河流	坝型	坝高 /m	装机容量 /万 kW	使用部位	MgO 混凝土施工使用情况	使用效果
1	1976-05 ~1982	白山	吉林 桦甸	第二 松花江	重力 拱坝	149.5 (63.7)	170	全坝 使用	大坝内部和基础混凝土均采用内含 4.5% 左右 MgO 的抚顺矿渣大坝 425 号和硅酸盐大坝 525 号水泥施工,全坝共浇筑内含 MgO 水泥混凝土 163 万 m ³ .工程实践证明,抚顺水泥具有低热、高强和微膨胀性能.	G(t)95% 为膨胀型的,膨胀量在 60 × 10 ⁻⁶ 以上的占 30%, 20 × 10 ⁻⁶ 以上的占 65%,平均 40 × 10 ⁻⁶ 左右,膨胀变形起到补偿作用.
2	1984 ~1986	红石	吉林	第二 松花江	重力坝	51		全坝 使用	这是一座内含 MgO 水泥混凝土试验坝,全坝采用抚顺水泥施工,共浇筑 MgO 混凝土 2 万 m ³ ,施工中取消全部温控措施,只重点加强大坝表面的保温措施.	膨胀变形起了补偿作用,达到设计要求和预期目标.
3	1987-08	石塘	浙江 云和	龙泉溪	重力坝	38.3	3.3	左右岸 护坦	在石塘作了两次外掺 MgO 混凝土生产工艺现场试验:第一次是 1987 年 8 月在左岸护坦,试块尺寸 12 m × 7 m × 1.5 m;第二次是 1989 年 4 月在右岸护坦,试块尺寸 22 m × 6.5 m × 1.8 m;两次掺与不掺 MgO 试块尺寸相同,用江山普硅 525 号水泥,外掺 4.4% MgO.	第一次 1a 的 G(t) 为 80 × 10 ⁻⁶ ;第二次 90 d 的 G(t) 为 65 × 10 ⁻⁶ ,补偿应力为 0.4 ~ 0.6 MPa,外掺工艺获得成功.
4	1989-01	铜街子	四川 乐山	大渡河	RCC 重力坝	82	60	厂坝连 接及导 流底孔	1989 年 1 月在导流明渠右导坝坝段上作现场试验,采用峨眉普硅大坝 525 号水泥外掺 4% MgO 施工.1989 年厂坝连接宽槽回填了膨胀混凝土.1992 年 4 月导流底孔封堵,采用低热 425 号水泥厂掺 4.5% 的 MgO 混凝土施工.	试验坝的 G(t) 为 30 × 10 ⁻⁶ ,宽槽中的 G(t) 为 (100 ~ 120) × 10 ⁻⁶ ,堵头的 G(t) 达到 (191 ~ 237) × 10 ⁻⁶ ,效果好.
5	1990-01 ~03	东风	贵州 清镇	乌江	双曲 拱坝	162 (25)	51	基础深槽、 导流洞及 导流底孔	1989 年 4 月在下游重力坝围堰作了外掺 MgO 混凝土筑坝现场试验.1990 年 1 月至 3 月在大坝基础深槽回填 MgO 混凝土 1.37 万 m ³ ,深槽尺寸 52 m × 41 m × 10 m,原设计分 36 块,后减至 12 块,用贵州硅酸盐 525 号水泥外掺 3.5% MgO,60 d 浇完深槽混凝土.1994 年 1 月导流洞及底孔封堵,外掺 4% ~ 4.5% MgO,共浇 MgO 混凝土 0.9 万 m ³ .深槽 1992 年 6 月部级鉴定为国际领先水平.	围堰 G(t) 为 (100 ~ 140) × 10 ⁻⁶ ,深槽 G(t) 稳定在 (110 ~ 120) × 10 ⁻⁶ ,最大 165 × 10 ⁻⁶ ,施工缝结合紧密,用高压水冲和放大镜找不见施工缝,膨胀量达到设计要求;封堵块的 G(t) 达到 (140 ~ 160) × 10 ⁻⁶ ,技术经济效益显著.
6	1990-07 ~1991-07	青溪	广东 大浦	汀江	重力坝	51.5	14.4	大坝基础 约束区	在 3 ~ 18 个坝段中的大坝基础约束区 7 ~ 8 m 高内全浇筑 MgO 混凝土,其中厂房和右岸重力坝段全用,采用文福普硅 425 号水泥外掺 2% ~ 5% MgO,共计浇筑 MgO 混凝土 6.8 万 m ³ ,取消了温控措施,加快了进度,1993 年 5 月部级鉴定为国际先进水平.	80 d 的 G(t) 为 (70 ~ 80) × 10 ⁻⁶ ,120 d 的为 (90 ~ 98) × 10 ⁻⁶ ,最终可达到 100 × 10 ⁻⁶ 以上,达到设计要求,补偿应力为 0.3 ~ 0.6 MPa,在国内外尚属首例.
7	1990-07 ~12	水口	福建 古田	闽江	重力坝	101 (72)	140	大坝基础 约束区	5 个坝段中的大坝基础约束区 14 m 高以内浇筑 MgO 混凝土,采用顺昌硅酸盐 525 号水泥外掺 4.4% ~ 4.8% MgO,共计浇筑 MgO 混凝土 7.5 万 m ³ ,取消了纵缝和冷却水管以及后期冷却措施,加快了施工进度.	一般 G(t) 为 (70 ~ 80) × 10 ⁻⁶ ,补偿应力为 0.3 ~ 0.5 MPa;未掺 MgO 混凝土的 G(t) 则收缩 (20 ~ 30) × 10 ⁻⁶ .
8	1991-11 ~12	普定	贵州 安顺	三岔河	RCC 拱坝	75 (28)	7.5	基础垫层 及导流洞	在基础垫层 2 m 内浇筑常态 MgO 混凝土 0.37 万 m ³ ,采用贵州硅酸盐 525 号水泥外掺 3.2% MgO,中间分缝完全闭合.1993 年 3 月封堵导流洞,外掺 3.8% MgO,堵头长 18 m,浇筑 MgO 混凝土 0.2 万 m ³ .简化了温控措施,加快了进度,效果好.	垫层 G(t) 为 80 × 10 ⁻⁶ ,中缝闭合,堵头 G(t) 为 110 × 10 ⁻⁶ ,压应力为 0.3 ~ 0.5 MPa,提高了堵头的防渗性.
9	1994-06 ~1995-06	铜头	四川 芦山	宝兴河	双曲 拱坝	77 (15.2)	8	基础垫座 及左右 导流洞	拱坝基础垫座高 6.5 m,采用夹江中热 425 号水泥,由厂掺 3% 的 MgO,通仓连续浇筑 MgO 混凝土 0.7 万 m ³ 左右.左右岸导流洞堵头混凝土也由厂掺 MgO (分别为 5% 和 4%),以及坝区两岸裂缝处理等部位共浇筑 MgO 混凝土约 0.8 万 m ³ .	垫座 G(t) 为 51 × 10 ⁻⁶ 以上;右导流洞的 G(t) 为 (65 ~ 75) × 10 ⁻⁶ ;左导流洞 G(t) 达到 (110 ~ 120) × 10 ⁻⁶ ,效果好.
10	1995-11 ~1997-10	飞来峡	广东 清远	北江	重力坝	52.3	14	大坝基础 约束区	基础约束区 9 m 以内掺 3.5% MgO,9 ~ 12 m 内掺 1.75% MgO,采用英德 425 号和广州金羊 525 号水泥外掺 MgO 混凝土施工,在挡水坝、溢流坝、厂房坝段及船闸等基础约束部位共计浇筑外掺 MgO 混凝土 16 万 m ³ ,施工中取消了温控措施.	膨胀量达到设计要求,G(t) 在 114 × 10 ⁻⁶ 及其以上,取消了温控措施,加快了施工进度.

注:坝高一栏中,括号中数据为底宽(下同).

续表 2

序号	使用时间	电站名称	建设地点	河流	坝型	坝高 /m	装机容量 /万 kW	使用部位	MgO 混凝土施工使用情况	使用效果
11	1996-01 ~ 02	龙潭	四川卧龙	渔子溪	闸坝	30	2.4	压力钢管 外围	在压力钢管外围四周回填 MgO 混凝土, 不仅可使钢管的厚度减薄, 而且钢管与混凝土及岩围结合紧密, 使之共同承压. 本管径 4 m, 采用白花普硅 425 号水泥外掺 4.5% MgO 混凝土施工, 浇 MgO 混凝土 0.15 万 m ³ , 取消了灌浆工序, 提前 6 个月发电.	$G(t)$ 达到 110×10^{-6} 以上, 取消灌浆工序, 加快了进度, 停运检查钢管与混凝土结合紧密.
12	1996-01	黄兰溪	福建福安		闸坝	31.8	3	压力钢管 外围	引水洞长 8.12 km, 水头 490.5 m, 采用宁国水泥熟料由宁德水泥厂掺 3% ~ 4% MgO, 在压力钢管外围四周回填 MgO 混凝土, 管径 1.8 m, 埋有 2 个断面观测仪器.	$G(t)$ 为 95×10^{-6} , 钢管与混凝土结合紧密, 取消灌浆工序, 加快了进度, 达到了设计要求.
13	1996-08 和 1998-12	二滩	四川盐源	雅砻江	双曲拱坝	240	330	工程探洞, 表孔拱坝	表孔顶梁高 15 m, 长 20 m, 在 7 个表孔顶梁之间回填 MgO 混凝土, 使顶梁连接成承重拱, 采用渡口 525 号硅酸盐大坝水泥外掺 3% MgO, 工程探洞回填, 共计浇筑 MgO 混凝土 1.2 万 m ³ .	保证了工程质量, 其 $G(t)$ 长期稳定在 $(60 \sim 70) \times 10^{-6}$, 效果好.
14	1996-12 和 1999	花滩	四川荣经	荣河	RCC 重力坝	85 (70)	2.4	基础垫层 防渗体、 导洞	RCC 基础垫层 2 m, 坝周边 1 m, 上游防渗体底宽 6 m, 顶宽 3 m, 导流洞堵头等部位共浇筑 MgO 混凝土 6.75 万 m ³ , 采用夹江普硅 425 号水泥厂掺 3.5% MgO, 导流洞长 8.5 m, 马蹄形, 浇 MgO 混凝土 5000 m ³ .	$G(t)$ 达到 100×10^{-6} 左右, 提高了 RCC 的防渗能力, 确保了工程质量.
15	1996-12 前	莲花	黑龙江海林	牡丹江	面板堆石坝	71.8	5.5	导流洞	工程导流洞封堵, 采用略阳低热 425 号水泥再外掺 4.5% MgO 浇筑导流洞堵头, 共计浇筑 MgO 混凝土 2 万 m ³ 左右.	$G(t)$ 可达 $(200 \sim 240) \times 10^{-6}$, 取消了接触灌浆工序, 提高了堵头防渗能力.
16	1997-05	红叶 I 级	四川埋县	杂谷脑河	闸坝	26	1.7	高压钢管 外围	高压管道长 160 m, 管径 2 m, 在钢管外围四周回填 MgO 混凝土 0.35 万 m ³ , 采用夹江硅酸盐 425 号水泥厂掺 5% MgO, 用泵送混凝土施工.	取消了灌浆工序, 加快了施工进度, $G(t)$ 达到 120×10^{-6} , 效果好.
17	1998-10 ~ 1999-05	黑土坡	四川埋县	寿溪河	闸坝	20	2.4	高压钢管 外围	电站引水洞长 5140 m, 高压管道长约 600 m, 钢管内径 3 m, 采用夹江普硅 425 号水泥厂掺 5.5% MgO, 在压力钢管外围四周回填浇筑 MgO 混凝土 0.6 万 m ³ 左右, 省去了灌浆工序, 衬砌厚度为 0.5 ~ 0.6 m.	$G(t)$ 达到了 120×10^{-6} , 取消了灌浆工序, 加快了施工进度, 确保了工程质量, 效果好.
18	1999-01 ~ 04	长沙	广东阳春	潭水河	双曲拱坝	55.5 (9.66)	0.128	全坝使用 (外掺 MgO)	混凝土总量 3.1 万 m ³ , 为龙头水库, 库容 1300 万 m ³ , 全坝采用云浮金鹰 525 号水泥外掺 MgO 混凝土施工, 根据温控设计要求, 按上、中、下三部分分别外掺 4.5%, 4.2%, 3.5% MgO. 全坝不分纵横缝, 实行通仓整体连续浇筑, 大约每 4 d 大坝上升 2.5 m, 90 d 建成. 取消了温控措施, 只进行了表面保温和养护工作 ^[1] .	这是国内外第一座全坝不分块实行通仓整体浇筑的薄拱坝, 取消了温控措施, 加快了施工进度, 节约了工程投资, 其 $G(t)$ 可达到 160×10^{-6} 以上.
19	1999-02	沙牌	四川汶川	草波河	RCC 拱坝	132	3.6	基础垫层 及垫座	大坝基础垫层为 1 m 厚的常态混凝土, 碾压混凝土基础垫座高 14.5 m, 采用白花中热 425 号水泥厂掺 2.6% ~ 3.1% MgO (总量 5%), 不分块整体通仓浇筑 MgO 碾压混凝土 5 万 m ³ , 取消了温控措施.	垫层 $G(t)$ 可达到 $(100 \sim 120) \times 10^{-6}$, 垫座碾压混凝土 $G(t)$ 达 $(90 \sim 100) \times 10^{-6}$.
20	1993-06 前	李家峡	青海尖扎	黄河	双曲拱坝	165 (40)	200	基础处理	采用永登 525 号硅酸盐大坝水泥外掺 2.5% MgO, 已经在大坝基础断层及基础处理中应用 MgO 混凝土施工. 原设计计划在大坝基础约束区 15 m 高内浇 MgO 混凝土 20 万 m ³ , 后因施工组织工作不完善, 上级主管部门不允许继续使用, 所以该工程最终未按原计划实施.	因施工组织工作不到位, 所以该工程未能按原计划在坝上施工, 值得同行引以为戒!
21	1999-04 ~ 2000-05	石门子	新疆昌吉州玛纳斯县	塔西河	RCC 拱坝	109 (31)	0.64	大坝	用祁连 525 号水泥, 掺 2% MgO, 坝长 176.5 m, 顶宽 5 m, 浇 MgO 混凝土 21 万 m ³ .	减少了收缩水泥的体积变形, 提高了 RCC 混凝土的抗裂性能.
22	2000-01 ~ 2001-06	龙首	甘肃张掖	黑河中游	RCC 拱坝	80 (13.5)	5.2	大坝	坝长 141 m, 顶宽 5 m, 采用永登 525 号水泥, 掺 3% ~ 4.5% MgO, 浇 MgO 混凝土 6.83 万 m ³ .	上游面 1.5 ~ 4 m 用 1 级配混凝土防渗, $G(t)$ 达到 $(45 \sim 60) \times 10^{-6}$, 提高了 RCC 混凝土的抗裂能力.
23	1998 ~ 2000-05	冷竹关	四川康定	瓦斯沟	闸坝	22.5	16.5	高压管道 外围	采用夹江 425 号硅酸盐水泥, 厂掺 MgO, 加镁含量为 5.33%, 在高压管道外围回填 2 级配 MgO 混凝土, 共计 4500 m ³ 左右.	取消灌浆工序, 加快了施工进度, $G(t)$ 达到 $(130 \sim 150) \times 10^{-6}$, 效果好.

续表 2

序号	使用时间	电站名称	建设地点	河流	坝型	坝高 /m	装机容量 /万 kW	使用部位	MgO 混凝土施工使用情况	使用效果
24	2000-12 ~2002-06	红叶 II 级	四川理县	杂谷脑河	闸坝	11.5	9	压力钢管 外围	低闸引水式电站,隧洞长 7703 m,内径 6.3 ~ 7.0 m,主管内径 4.2 m,长 323 m,支管内径 2.25 m,长 44 m,采用夹江 425 号水泥,厂掺 5% MgO,浇 MgO 混凝土 8000 m ³ .	取消了灌浆工序,加快了施工进度,保证了质量, $G(t)$ 达到 150×10^{-6} 以上,效果好.
25	2001-04 ~10	沙老河	贵阳市北郊	沙老河	双曲拱坝	61.2 (13)	(水厂)	全坝使用	沙老河水库库容 1500 万 m ³ ,为贵阳市供水工程,采用贵州普硅 525 号水泥外掺 5% MgO,掺粉煤灰 30% ~ 40%,4 级配混凝土,184 d 建成大坝,共浇筑 MgO 混凝土 5 万 m ³ ,未分横缝施工.	实测坝体最大的 $G(t)$ 为 130×10^{-6} ,多数 $G(t)$ 为 $(70 \sim 80) \times 10^{-6}$,设计为 130×10^{-6} 以上.
26	2002-12 ~2003-06	三江	贵阳市北郊	三江河	双曲拱坝	71.5 (11.5)	(水厂)	全坝使用	三江水库库容 700 万 m ³ ,坝轴线长 136 m,采用贵州普硅 525 号水泥,掺粉煤灰 30%,外掺 5% MgO,4 级配混凝土,浇筑 MgO 混凝土 4 万 m ³ ,共用 186 d 浇完大坝.	历时半年于 2003 年 6 月建成.在坝左右 (0.7H 以上) 各设了 1 条诱导缝.
27	2003-02 ~07	坝美	广东乳源	北江 二支 大潭河	双曲拱坝	53.5 (10)	0.8	全坝使用	坝轴线长 127.4 m,库容 2550 万 m ³ ,采用韶关三江普硅 425 号水泥,外掺 5.5% MgO,掺粉煤灰 20%,浇筑 MgO 混凝土,3.8 万 m ³ ,160 d 浇完大坝.	不分横缝快速筑拱坝,120 d $G(t)$ 为 $(92 \sim 100) \times 10^{-6}$.

2.1 在重力坝上的应用

广东青溪水电站是河床式径流电站,大坝由左右岸重力坝段、厂房坝段和溢流坝段组成,挡水建筑物总长 315 m.在 18 个坝段除 1,2 号坝段外,其余 16 个坝段在基础约束区全部浇筑 MgO 混凝土,其高度约为 7 ~ 8 m,相当于坝块长度的 1/2 左右.厂房坝段和右岸重力坝段,因坝不高和施工因素等原因全断面采用 MgO 混凝土施工,取消了加冰拌和等降温措施.浇筑温度由 23℃ 放宽到 31℃,为了防止表面裂缝,上、下游坝面采用 2 cm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料板进行全年保温.无应力计实测 MgO 混凝土的自生体积变形多数为 $(80 \sim 100) \times 10^{-6}$,补偿应力可达 0.6 MPa,满足设计要求.对使用 MgO 混凝土的 16 个坝段进行检查,未发现有基础裂缝.青溪电站在基础约束区全面采用外掺 MgO 混凝土筑坝技术,这在国内外尚属首例.工程采用 MgO 混凝土施工的投资为加冰等常规温控措施投资的 53.1%,取得显著的技术经济和社会效益.该项目于 1993 年 5 月经部级鉴定为国际先进水平.同样,福建水口和广东飞来峡水电站也采用了 MgO 混凝土筑坝技术.

福建水口电站采用 MgO 混凝土以解决夏季施工混凝土降温困难的问题,使浇筑温度提高了 8℃,达到 22℃,从而保证了夏季施工的正常进行.水口电站的工程实践,为我国高坝推广 MgO 混凝土筑坝技术积累了经验.

此外,为了在高温的夏季施工,四川东西关电站厂房坝段基础、湖南凌津滩电站重力坝的基础部位,都采用了外掺 MgO 微膨胀混凝土筑坝技术,并取得了较好效果.

2.2 在回填和封堵工程中的应用

四川铜街子电站,两条临时导流底孔断面尺寸

6 m × 8 m,长约 35 m,回填 MgO 混凝土约 3500 m³.设计要求取消全部温控措施,侧壁不灌浆,自生体积变形要达到 $(160 \sim 240) \times 10^{-6}$,其后的变形能长期保持稳定,并略有增长.为了满足设计要求,决定采用略阳水泥厂生产的 425 号低热微膨胀水泥,再外掺 4.5% 的 MgO 混凝土一次性封堵导流底孔.通过所埋设的无应力计,实际观测到的最终自生体积变形在 $(191.4 \sim 237.3) \times 10^{-6}$ 之间,完全达到了设计所要求的膨胀量.

贵州东风电站高薄拱坝基础深槽回填、导流洞和导流底孔封堵均采用外掺 MgO 混凝土筑坝技术.深槽底宽 20 m,顶宽 52 m,长 41 m,深 10 m(原 20 m),回填 MgO 混凝土 1.37 万 m³.采用 MgO 混凝土施工,只用 60 d 就浇完了深槽混凝土,比原计划提前 45 d.1991 年 1 月对深槽工程进行全面检查,未找到裂缝,说明膨胀使施工缝结合得非常紧密.采用外掺 3.5% MgO 混凝土浇筑的基础深槽,其自生体积变形长期稳定在 $(110 \sim 120) \times 10^{-6}$,膨胀量满足设计要求.将外掺 MgO 混凝土新技术应用于高薄拱坝基础深槽,这在国内外尚属首次,1992 年 6 月通过部级鉴定,对该项目总体评价为属国际领先水平.

外掺 MgO 混凝土筑坝技术在铜头、普定、花滩、莲花、五强溪等电站导流洞封堵工程中也得到了成功应用.在二滩工程探洞回填和表孔顶拱部以及李家峡大坝基础处理中,也采用了 MgO 微膨胀混凝土筑坝技术.

2.3 在碾压混凝土坝中的应用

为了取消接触灌浆和提高碾压混凝土坝的防渗能力,在普定电站碾压混凝土坝基础垫层、沙牌电站碾压混凝土坝基础垫层与垫座、铜街子厂坝连接处均采用了 MgO 混凝土筑坝技术.甘肃龙首和新疆石

门子两座碾压混凝土拱坝全坝都使用了 MgO 混凝土施工.四川花滩电站碾压混凝土重力坝的基础垫层、垫座、周边及上游防渗体,成功地使用了 MgO 混凝土筑坝技术.

2.4 在压力钢管外围回填中的应用

在电站压力钢管周围回填 MgO 微膨胀混凝土,可以完全取消传统的施工工艺和繁琐的灌浆程序.利用 MgO 混凝土的延迟膨胀变形特性可填实补偿回填混凝土与压力管道间所产生的收缩缝隙,使回填混凝土与压力钢管和围岩界面形成紧密结合状态,这既省去了繁琐的接触灌浆工序,又确保了压力钢管和围岩共同作用的能力.这项新技术已先后在福建省的黄兰溪电站、四川省的龙潭电站、红叶 I 级电站、红叶 II 级电站、冷竹关电站和黑土坡电站压力管道外围回填衬砌工程中得到成功应用.实践证明,这项新技术可在类似管道工程中广泛应用.

2000 年 2 月,位于重庆市长寿县境内的大洪河水电厂,对已使用 40 年的压力钢管进行改造.在原直径为 450 cm 的旧钢管里面,再内衬直径为 410 cm 的新钢管,并在两钢管之间充填灌筑 1 级配 MgO 混凝土.采用夹江普硅 425 号水泥,外掺 4% MgO,90 d 的自生体积变形已达到 124×10^{-6} 以上,满足设计要求.与原常规方案比较,取消了接缝灌浆,加快了施工进度,缩短了工期,减少了因停机停产带来的经济损失.该实例对类似改造工程具有借鉴意义.

2.5 在薄拱坝全坝段上的应用

广东长沙电站大坝^[1]为双曲薄拱坝,坝高 55.5 m,底宽 9.66 m,顶宽 3.87 m,坝顶长 140 m,混凝土总量 3.1 万 m^3 .全坝采用外掺 MgO 混凝土施工,总工期为 90 d.其自生体积变形可达 160×10^{-6} 以上,基本上满足设计要求.长沙电站的工程实践,是温控设计和简化温控的重大突破,对简化施工工艺、加快施工进度、改善工程质量、提高经济效益都是十分有益的.

在全坝全断面采用外掺 MgO 微膨胀混凝土筑坝技术,在国内外尚属首例,长沙坝的成功实践,为这项新技术在混凝土拱坝全面推广应用,积累了宝贵的实践经验,必将对世界筑坝技术产生深远的影响.以后采用同样技术在贵州省修建了沙老河拱坝,以及三江拱坝(设了诱导缝)和广东坝美拱坝.

2.6 研究现状和应用前景

随着应用科学技术的进步和上述工程实践不断深化以及人们的认识加深,自然会提出更高更全面解决工程问题的需求.广东省水利厅于 2000 年确立了“外掺 MgO 混凝土不分横缝快速筑拱坝技术应用研究”课题^[2]为省重点科技攻关项目.课题从仿真分

析^[3]与程序设计、材料科学试验、快速施工技术、大坝原体观测等多方面进行更全面、深入和系统的研究.通过这些带有一定突破性的研究,不仅对完善和发展 MgO 混凝土筑坝技术意义重大,而且有可能提出相关技术标准和方法,再将其规范化作为技术导则指导广东省的水电建设.这必将大大推动 MgO 混凝土筑坝技术的发展和更广泛地推广应用.

3 经济效益浅析

采用 MgO 混凝土,辅以其他的适当措施(如表面保温和养护等),可以全部或部分取代传统的混凝土坝温控措施(即取消接触和接缝灌浆、骨料预冷、加冰拌和、预埋冷却水管、通水冷却、薄层或分块浇筑等措施),不仅有利于解决混凝土坝的开裂问题,而且可以实现长块、厚层、通仓连续(或短间歇)浇筑,可以全天候施工(夏季也是一个很好的施工季节),从而大大降低工程造价,简化施工工艺,缩短工期,加快施工速度,因此,具有重大的技术经济优势和推广应用前景.据小水电站实例统计,工程提早发挥效益,可获得相当于坝体投资 30% 以上的经济效益^[2].

广东青溪电站大坝,在使用 MgO 混凝土部位实现厚层、短间歇、连续快速施工,最大浇筑层厚 4.6 m,最短间歇时间 3 d,在 55 d 内大坝上升 22 m,达到快速筑坝的效果.与混凝土的常规温控方法比较,工期提前了 2 个月,根据施工单位测算,2 个月可创产值 320 万元.提前 2 个月发电,按每度电 0.1 元计算,可获得电费 621.5 万元;每立方米常规混凝土温控费用的综合单价为 16.57 元,MgO 混凝土的单价只占常规混凝土的 53.1%,总计 6.8 万 m^3 MgO 混凝土,可为工程节约温控费用 52.8 万元.青溪电站采用 MgO 混凝土施工后,共计获得经济效益近 1000 万元.

另外广东飞来峡电站的规模与青溪电站相同,采用 MgO 混凝土筑坝技术后,可缩短 1 年工期,如果也按与青溪电站相同的方法测算,可获得经济效益在 3000 ~ 5000 万元之间.另外长沙拱坝节约了工程总造价的 20%,取得的经济效益十分显著.

贵州东风电站大坝基础深槽混凝土方量 1.37 万 m^3 ,按原施工进度要求,1990 年 4 月必须将深槽混凝土浇到大坝基建面 825 m 高程,否则将会严重拖延两坝肩开挖和大坝混凝土浇筑,即要损失 1 年工期.而要在完成深槽开挖后仅余的 85 d 时间里,完成深槽混凝土的浇筑任务是极其困难的,由于 MgO 混凝土的膨胀变形可使深槽混凝土和周围岩体紧密结合在一起,满足传力要求,因此,设计采用了外掺 MgO 混凝土筑坝技术,以简化温控措施,加快

施工进度.实施中不仅取消了全部温控措施,而且只分12个浇筑块,顺利地完成了深槽回填混凝土的任务,比预定工期提前了45d.东风电站工程采用外掺MgO混凝土筑坝技术,直接节约温控和灌浆费用57.5万元,减少了分缝分块,不仅在一个汛期浇完了深槽混凝土,而且为工程抢回了1年的施工工期,为国家挽回了2.04亿元的电能损失,其间接经济效益极为显著.

4 结 语

a. 通过大量研究说明,应用MgO水化所释放的化学能可以解决大坝温控问题,打破了人们的传统观念,认识到MgO既是有害的物质,又是有用的物质,关键是掌握其规律性,兴利除弊.通过近30年的全面、系统及深入的基础理论和应用研究,已掌握了MgO的特性和规律,在MgO水泥化学机理、混凝土变形性能、大坝温度应力补偿和施工工艺控制等方面已形成了一套完整的筑坝理论体系.尤其是在MgO混凝土的长期体积变形与力学性能、长期耐久性^[4]、自生变形的温度效应、大掺粉煤灰的影响^[5]以及不分横缝快速筑拱坝应用技术等方面的研究,获得的成果意义重大.MgO混凝土筑坝技术,已在我国30余座大中型水利水电工程中应用,均获得了成功.

b. 利用MgO微膨胀混凝土的延迟膨胀变形特性,补偿混凝土坝的降温收缩和温度变形,以防止产生裂缝.大体积混凝土有抗裂和防渗要求的工程部位,均可采用外掺MgO混凝土施工技术,如大坝基础约束区、基础深槽回填及断层基础处理、填塘堵洞和导流洞封堵、厂坝连接宽槽回填、碾压混凝土坝垫层及垫座、周边及上游防渗体、堆石坝防渗面板、高压管道外围回填及隧洞衬砌地下结构的防渗工程、预应力混凝土及工程灌浆等工程,都可采用MgO混凝土施工,甚至可在各类混凝土坝的全坝全断面推广应用.不分横缝快速筑拱坝技术更值得发展应用,如不分横缝快速筑拱坝(长沙、坝美).

c. 工程实践证明,MgO水泥的膨胀性能主要决定于MgO膨胀剂的膨胀性能.因此,在采用MgO混凝土筑坝的过程中,必须严格按照有关的规程和规范进行,必须通过试验确定参数,必须切实抓好原材料质量和施工组织工作.采用MgO混凝土筑坝的指导方针是:积极慎重、稳妥可靠、精心设计、精心施工.只要严格要求并且搞好了施工组织工作,就能够确保外掺MgO混凝土的工程质量,最终达到快速筑坝的宗旨和目标,从而获得巨大的技术经济效益和社会效益.

在应用MgO混凝土筑坝过程中,也存在着违背

施工规范、施工管理及监督制度不健全、MgO原材料不到位等施工组织工作不完整的现象,从而产生不良影响,并往往因此而不得不放弃很好的使用和推广机会.此教训值得深思并引以为戒.

参考文献:

- [1] 刘振威.外掺MgO混凝土快速筑拱坝在广东长沙拱坝的应用[J].广东水利水电,2000(6):8~14.
- [2] 刘振威.“外掺MgO混凝土快速筑拱坝技术应用研究”课题及研究进展[J].广东水利水电,2003(2):1~3.
- [3] 袁明道,杨光华.MgO微膨胀混凝土自生体积变形模型的初步研究[J].广东水利水电,2003(2):6~7.
- [4] 李承木.外掺MgO混凝土的基本力学与长期耐久性[J].水利水电科技进展,2000,20(5):30~35.
- [5] 李承木.高掺粉煤灰对MgO砼自生体积变形的影响[J].四川水力发电,2000(8):72~75.

(收稿日期:2003-03-31 编辑:熊水斌)

(上接第53页)

5 结 语

水利工程建设会对区域生态与环境带来广泛而深远的影响,加强水利工程环境管理可以减轻工程对环境的不利影响,环境监理工作是确保工程建设中环境保护与管理顺利实施的必要保障.

实践证明,环境监理在水利工程建设期间发挥了极其重要的作用,降低了因修建水利工程给周围环境和人群健康带来的不利影响,给国内类似工程的环境保护提供了良好的示范.但是,水利工程在初期投入运行后还有大量的工作需要完善,如施工区及移民安置区的自然和生态环境都未及恢复,大量的生态修复和水土保持工作需要规划实施.这些工作在环境监理的监督和协助下既可以加快建设进度,又可以提高工作质量,并且可以作到充分利用资金.所以建议在工程的运行期,引入适当的环境监理制度,以保证水利水电工程效益的全面体现.

参考文献:

- [1] 金中彦,李国庆,张志强,等.万家寨引黄工程环境监理工作的实践和探讨[J].水利水电技术,2001,32(4):7~72.
- [2] 张宏安,尚宇鸣,解新芳,等.黄河小浪底工程建设中的环境监理[J].水电站设计,1999,15(3):95~98.
- [3] 崔学文.小浪底国际工程建设[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [4] 解新芳.黄河小浪底工程环境保护实践[M].郑州:黄河水利出版社,2000.

(收稿日期:2003-06-05 编辑:张志琴)