

外掺氧化镁混凝土快速筑坝技术综述

李承木

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院科学研究所 四川 成都 610072)

摘要: 全面总结了外掺氧化镁(MgO)混凝土快速筑坝技术的研究成果和工程经验,从基本理论、补偿原理、实现方法和施工技术等方面系统论述了外掺 MgO 混凝土快速筑坝技术的特点以及与传统柱状浇筑法的主要差异;阐明了 MgO 膨胀剂的特性及膨胀机理;介绍了外掺 MgO 混凝土的基本物理力学与变形性能,自生体积变形的特点和规律以及对仿真计算的影响,工程应用情况、应用条件与经济效益等,指出了设计、施工、试验和均匀性快速检测等工作中应当重视的问题。

关键词: 外掺 MgO 混凝土;快速筑坝技术;通仓快速浇筑;MgO 膨胀剂;自生体积变形

中图分类号: TV42⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2013)05-0082-07

Review of quick damming technology of MgO concrete//LI Chengmu (Science Research Institute ,CHIDI ,CHECC , Chengdu 610072 , China)

Abstract: This paper summarized the research achievements and engineering experience for the quick damming technology of the MgO concrete. The characteristics of quick damming technique of the MgO concrete and its difference from traditional cylindrical pouring methods were systematically reviewed based on the fundamental theories , compensation principles , realization measures , and construction technologies. Characteristics and expansion mechanism of the MgO-type expansive agent were illustrated. The basic physical and mechanical deformation properties , characteristics and patterns of autogenous volume deformation , and its influence on numerical simulations , engineering applications , and economic benefits as well as its application conditions were introduced respectively. Finally , the paper presents the problems concerning with the designs , constructions , experiments , and rapid detection of uniformity.

Key words: MgO concrete; quick damming technique; longitudinal fast pouring; MgO-type expansive agent; autogenous volume deformation

混凝土坝的裂缝及其防治是工程界高度关注的课题。混凝土坝建设周期长、投资大、温控复杂,传统柱状浇筑法各工种之间干扰大,很难做到快速施工。采用外掺氧化镁(MgO)混凝土快速筑坝技术,辅以其他适当的综合性措施,可解决上述问题,真正实现快速施工。外掺 MgO 混凝土筑坝技术来源于生产工程实践,经过了长期试验研究后提出,利用 MgO 材料水化所释放的化学能来解决大坝温控问题,突破了人们的传统认识。我国组织多学科共同攻关,经过 30 多年的基础理论和工程应用研究,全面掌握了外掺 MgO 混凝土的物理力学性能及长期膨胀变形规律^[1-2],在膨胀机理、变形性能、应力补偿理论、施工措施、均匀性控制及安定性试验方法等方面已形成了一套完整的筑坝理论体系^[3],并在我国至少 17 个省 50 余个工程的不同部位得到应用(其中全坝外掺 MgO 混凝土拱坝有 14 座)^[4-5]且均获得了成功。

这是我国工程技术人员独创的筑坝技术,具有自主知识产权,它是大体积混凝土施工的革命,在我国具有广泛的推广应用前景。本文主要论述外掺 MgO 混凝土筑坝技术与传统柱状浇筑法之间的基本差异,着重从补偿原理、基本方法、MgO 材料特性及膨胀机理、外掺 MgO 混凝土的力学性能及膨胀变形规律、工程应用情况、设计技术、施工方法、材料试验、坝体保温、均匀性检测等方面进行系统的综述,供工程界同行参考,以期共同推动这项技术不断向前发展。

1 外掺 MgO 混凝土快速筑坝技术的特点

a. 基本理论。利用 MgO 独特的具有延迟性的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。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,即利用外掺 MgO 混凝土

作者简介:李承木(1939—),男,四川内江人,教授级高级工程师,主要从事水工建筑材料科学及外掺 MgO 混凝土筑坝技术研究。E-mail: shby99@163.com

的限制膨胀来补偿混凝土的限制收缩,以达到大坝防裂的目的。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产生(延迟性)膨胀。换句话说,就是造成一种预压应力抵消混凝土冷却时产生的拉应力。

b. 防裂原理。传统混凝土筑坝方法采取多种温控措施来控制筑坝过程的温差,尽可能降低入仓浇筑温度,使温度产生的拉应力控制在混凝土允许的范围内;而外掺 MgO 混凝土筑坝技术则是把过去的预冷措施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。

c. 实现方法。外掺 MgO 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 MgO 来实现的。这个掺量必须满足压蒸安定性合格标准,尽可能达到温控设计的膨胀量。通过外掺 MgO 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。

d. 施工技术。传统的筑拱坝施工方法需分缝分块、柱状薄层浇筑,需采取封拱灌浆等既不经济又十分复杂的施工工艺,各种工序之间互相干扰大,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。外掺 MgO 混凝土筑拱坝施工方法不分横缝(或设少量诱导缝,以释放过大超标拉应力),分层通仓浇筑,以台阶法连续滚动推进,不埋冷却水管,不需封拱灌浆,可全天候施工(夏季也是很好的施工季节),这就极大地加快了施工速度,可实现快速施工。外掺 MgO 混凝土筑坝方法与常规方法大体相同,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法,二者的主要区别^[6]在于:①为了确保均匀,拌和时间需延长 1~2 min;②通仓连续快速浇筑的强度稍大,需要适当增大拌和能力(即为常规的 1.5 倍);③要求有一个称量准确、快速投料、拌和均匀、卸混凝土拌和物灵活迅速的混凝土拌和系统;④要有足够的拌和能力、运输能力、吊运能力、浇捣能力和完善及时的材料供应保证体系;⑤进行混凝土施工配合比试验时,应做 MgO 水泥的压蒸安定性试验,通过压蒸试验来设计 MgO 掺量,增加自生体积变形试验并考虑温度的影响。

e. 使用条件。基本要求是外掺 MgO 后水泥的标号不降低,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^[7],当混凝土自生体积膨胀变形量达到 $150 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ (华南地区达 100×10^{-6}) 时,方可省去预冷骨料和冷却水管,即可采用外掺 MgO 混凝土筑坝技术实行通仓快速浇筑。

2 MgO 膨胀剂的基本性能及膨胀机理

a. 南京化工学院唐明述等的长期研究结果表明,外掺轻烧 MgO 的掺量、膨胀量、膨胀速率、膨胀过程、膨胀终止时间都是可调控的^[3]。通过调控煅烧温度、保温时间、晶体尺寸、颗粒粒度来控制其水化速率和膨胀量,用活性指标、CaO 含量、烧失量来评定 MgO 的质量。MgO 膨胀剂的膨胀能力与 MgO 的存在形态有关(即固溶体与玻璃体不膨胀,方镁石晶体才产生膨胀),而晶体形态又与煅烧工艺有着极密切的关系。大量试验研究表明:烧成温度越高,方镁石水化速率越慢,但 MgO 含量会提高。仔细调温可控制晶体尺寸,高温下保温时间长,晶体尺寸大,高温水化速率快,膨胀量大,常温水化速率慢则膨胀量小;反之保温时间短,晶体尺寸小,其活性大,水化速率快,膨胀量大。冷却速率影响结晶形态,急冷形成的方镁石结晶体多,水化膨胀量大;慢冷则形成的结晶体少,对膨胀不利。MgO 颗粒越粗,常温水化速率越慢,高温水化速率越快,膨胀量越大;MgO 颗粒越细,分布越均匀,其膨胀量就越小且较早趋于稳定。通常 MgO 掺量高,膨胀量大;环境养护温度高、水化速率快,膨胀量大。CaO 含量会影响早期膨胀速率,对压蒸膨胀率也有影响(使其压蒸率偏大)。煅烧温度低于 900℃ 烧成的 MgO 材料的活性太高,水化膨胀反应速率过快;高于 1200℃ 烧成的 MgO 材料的水化膨胀反应速率就非常慢;超过 1600℃ 烧成的 MgO 材料在常温下就几乎没有水化反应。

b. 影响膨胀性能的因素较多,除 MgO 材料的膨胀特性外^[8-9],水泥品种质量与储存时间、混合材料种类与掺量、MgO 掺入方式与掺量、骨料级配与胶材用量、外加剂品种及掺量、水泥中游离氧化钙(fCaO)含量等因素对膨胀性能均有影响,水泥中游离氧化钙含量对压蒸膨胀率的影响也较大。研究表明,回转窑产品的性能质量、膨胀量及稳定性均优于反射窑产品。使用时要求外掺 MgO 水泥的标号不降低, MgO 分布要均匀,压蒸安定性必须合格,有良好限制条件的工程均可应用。MgO 膨胀材料很容易受潮,一定要采取防潮措施,必须做好储存期间的防潮工作。

c. 大量试验研究结果^[10-11]表明, MgO 材料完全水化膨胀必须有足够高的温度($\geq 200^\circ\text{C}$)和压力($\geq 1.5 \text{ MPa}$)条件,否则在短时间内不可能使其完全水化膨胀,更无法确定 MgO 的极限安全掺量。压蒸膨胀率通常用来评估 MgO 的极限膨胀能力,压蒸试验是检验外掺 MgO 混凝土体积安定性的唯一方

法^[12-13]其他试验方法(包括沸煮法、长度法等)均不适用于 MgO 膨胀材料的固有特性。

d. 大量试验研究和原体观测结果表明, MgO 膨胀剂的膨胀速率在水化 3 ~ 30 d 期间最大,其膨胀量的 70% 发生在 7 d 龄期之后,一般在 1 a 之后基本趋于稳定状态。当环境温度突变时其膨胀量不会降低, MgO 混凝土抵御寒潮的能力强于普通混凝土^[14]。MgO 的水化产物稳定性强,它的溶解度极小(氢氧化钙的溶解度要比氢氧化镁的溶解度大 205 倍)^[3]。试验表明, MgO 膨胀剂不溶于水,在水中呈悬浮状态。以纯 MgO 作胶凝材料所做的胶砂强度试验结果可达 9.0 MPa,相当于 52.5 号水泥胶砂强度的 1/6,在使用时应注意这种影响。MgO 在低温 7℃ 时也能够产生膨胀,但水化速率极慢,其膨胀过程线 3 周之后才出现正的膨胀值^[15],该结果消除了人们对 MgO 在低温条件下能否膨胀的疑虑。

e. MgO 的膨胀机理在于 MgO 水化时水镁石晶体的生成和生长发育^[16]。膨胀量主要取决于生成的水镁石晶体的尺寸、形貌和存在的位置,即细小(块状和短柱状)的聚集在 MgO 颗粒表面附近的水镁石晶体能产生较大的膨胀;粗大(针状或长柱状)的分散在 MgO 颗粒周围较大区域内的水镁石晶体引起的膨胀较小;碱能促进膨胀,对膨胀量有影响。膨胀能来自于水镁石晶体的肿胀力和结晶生长压力,即在水化早期,浆体的膨胀主要起因于极细小的水镁石晶体的吸水肿胀力;随着晶体的长大,晶体的结晶生长压力对浆体的膨胀起主导作用。掺混材料对 MgO 的水化膨胀具有抑制作用,即浆体孔隙液碱度降低和结构多孔的共同作用使得 MgO 水化产生的膨胀较小。

3 外掺 MgO 混凝土的物理力学及变形性能

3.1 基本物理力学性能

经过 30 多年的全面系统试验研究^[2],结果表明外掺 MgO 混凝土的力学、热学、变形、耐久性等性能都优于普通混凝土。相比普通混凝土,外掺 MgO 混凝土的徐变和极限拉伸值增大,一般可增大 20% 以上,干缩率可减小 20% 左右,其力学强度可提高 10% ~ 15%。长期耐久性能也优于普通混凝土,抗冻、抗渗、抗冲磨、抗侵蚀、抗碳化等能力都比普通混凝土有较大提高。实践证明,外掺 MgO 膨胀剂是提高大坝混凝土的抗裂防渗能力、提高密实度、增强耐久性能的最理想的膨胀材料。外掺 MgO 膨胀剂对混凝土的各项热学性能的影响不大,不同试验养护温度对外掺 MgO 混凝土的基本力学性能有一定的影响^[17]。

3.2 长龄期的力学性能

a. 笔者用 12 a 龄期的内含 MgO 混凝土徐变试验的对比试件,加工制作成标准试件后,测得的(不同龄期的)抗压强度和弹性模量均无明显降低现象^[2];白山大坝安检时,钻孔取芯样后所测 20 a 龄期的 MgO 混凝土抗压强度比施工时期的强度提高了 16.7%,其芯样动弹性模量的均值为 39.1 GPa,而抗压弹性模量的均值为 37.0 GPa,两者相近,说明试验结果可信^[18];广东长沙拱坝安检时钻孔取芯样的试验结果 5 ~ 6 a 龄期的抗压强度在 40 ~ 45 MPa 之间,比施工时期的强度提高 18.0% 以上。上述试验结果表明, MgO 混凝土的长期力学性能是安定的,微膨胀对混凝土力学性能的影响不大。

b. 有关研究^[2]表明,当自生体积变形在 150×10^{-6} ~ 250×10^{-6} 时外掺 MgO 混凝土的强度最高;当自生体积变形在 250×10^{-6} ~ 300×10^{-6} 时强度开始下降;达到 500×10^{-6} 时强度才开始急剧下降。由于水工混凝土要求补偿的微应变一般较小(150×10^{-6} ~ 200×10^{-6}),所以不会有强度降低现象产生。

3.3 自生体积变形的基本特性

a. 外掺 MgO 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温升之后混凝土显著的降温收缩期间,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^[19]。

b. 外掺 MgO 混凝土的自生体积膨胀是一种不可逆的变形,因为是 MgO 水化所释放的化学能所致,所以这种随着龄期和温度增加而增大的膨胀变形是永久性的。

c. 外掺 MgO 混凝土的自生体积变形与环境湿度基本无关,即只要 MgO 水化膨胀完成就不再受外界环境湿度变化的影响;但它受温度影响较大,即温度越高膨胀量越大,不同温度下的自生体积变形的最终稳定值各异^[20]。MgO 在低温下也能产生膨胀,但在低温时的水化膨胀反应速率要迟缓得多。

d. 外掺 MgO 混凝土自生体积的长期膨胀变形是很稳定的,因为外掺的是特制的轻烧 MgO,所以不会产生二次膨胀,其长期力学及变形性能既是安定的又是稳定的。

e. 补偿应力长期稳定,它是利用外掺 MgO 混凝土的限制膨胀来补偿混凝土的限制收缩,由化学能转变为机械能,所以这种自应力补偿是极为稳定的。

f. 外掺 MgO 混凝土自生体积变形是仿真分析计算中不可缺少的重要资料,它对温度徐变应力的影响较大,如不考虑自生体积变形计算得到的应力最大;考虑自生体积变形但不考虑温度对自生体积变形影响计算得到的应力居中;既考虑自生体积变

形又考虑温度的影响计算得到的应力最小,而且真实;所以在仿真分析时必须考虑自生体积变形与温度变化的影响,否则计算结果会失真。通常外掺 MgO 混凝土的自生体积变形量 $11 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$ 即可以得到 0.1MPa 的压应力^[14]。

g. 外掺 MgO 混凝土自生体积变形的膨胀量还与 MgO 掺量、环境温度、混合材料种类与掺量等诸多因素有关。研究^[21-22]表明, MgO 掺量每增减 1%, 自生体积变形大致增减 $20 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6}$; 自生体积变形的温度效应明显, 温度每增减 10℃ 时, 自生体积变形可增减 $30 \times 10^{-6} \sim 35 \times 10^{-6}$ 。当粉煤灰掺量在 30% (或 35%) 以内时对自生体积变形影响不大, 随其掺量增加自生体积变形还稍有增大; 当掺量超过 40% 时, 自生体积变形才明显减小。从粉煤灰抑制水泥砂浆变形的规律看, 在相同试验条件下, 当粉煤灰掺量在 40% 以内变化, MgO 掺量为 4% 和 6% 时, 砂浆试件的膨胀变形量却非常接近, 变形曲线的斜率一致, 过程线几乎重合, 不同 MgO 掺量的膨胀变形规律完全相同^[22]; 与不掺粉煤灰相比, 各组试件的膨胀变形降低率都在 36.8% ~ 44.7% 之间, 总平均降低率为 40.2%, 这表明掺粉煤灰对 MgO 膨胀确实有抑制作用, 同时还说明, 粉煤灰掺量的变化对水泥砂浆试件膨胀变形的影响不明显, 其敏感度减弱, 掺量越大敏感度越低, 所以变形降低率均在 40% 左右。从压蒸试验结果看规律性更明显^[23], 当粉煤灰掺量在 10% ~ 35% 时, 砂浆试件压蒸膨胀率在 0.52% ~ 0.48% 之间; 当掺量在 40% ~ 65% 时, 压蒸膨胀率则在 0.22% ~ 0.21% 之间, 可见粉煤灰掺量影响变形显著的界限是 35%。掺矿渣比掺粉煤灰对外掺 MgO 混凝土自生体积变形的影响要小。

4 外掺 MgO 混凝土工程应用情况

外掺 MgO 混凝土筑坝技术已在我国广泛应用于填塘堵洞、导流洞封堵、大坝基础处理、重力坝体底部强约束区、高压管道外围回填、碾压混凝土坝的垫层垫座及上游防渗体、防渗面板、拱坝全坝外掺 MgO 等 50 余个大中型水利水电工程的不同部位, 并且均获得了成功^[4,5,24]。从地域看, 已在我国广东、四川、贵州等 17 个省的不同气候条件下成功使用; 有在冬季、夏季施工的, 也有跨季节施工的; 工程量从不足 1 万 m^3 到近 30 万 m^3 ; 施工工艺有常态混凝土台阶法和碾压混凝土通仓浇筑法两种; 坝型有重力坝、拱坝、面板堆石坝等; MgO 掺量从 3.5% ~ 6.5%, 其膨胀量多在 $120 \times 10^{-6} \sim 240 \times 10^{-6}$ 之间(目前使用内含 MgO 水泥的碾压混凝土在 50×10^{-6} 以上), 均取得了显著的技术经济效益和社会效益。

5 外掺 MgO 混凝土筑坝技术的经济效益

采用外掺 MgO 混凝土筑坝技术能真正做到快速施工, 可实现长块、厚层、通仓连续(或短间歇)浇筑, 不分横缝, 不埋冷却水管, 不需封拱灌浆, 可全天候施工, 极大地提高了施工速度, 从而可缩短工期, 降低造价, 加快我国水力资源开发和水利水电工程建设步伐, 能获得巨大的技术经济效益和社会效益^[5]。实践证明, 发电站装机容量越大, 工程经济效益就越显著, 如某高拱坝, 电站装机为 420 万 kW, 若在坝基 36 m 强约束区采用 MgO 混凝土快速施工, 至少可提前 1a 发电, 预计可获得综合经济效益近百亿元。

6 设计、试验和施工中应重视的问题

通过不断总结工程实践经验, 在设计、施工和试验中除应遵循已有规程规范(WJM: 0035—1994《水利水电工程轻烧氧化镁材料品质技术要求》、WJM: 0023—1995《氧化镁微膨胀混凝土筑坝技术暂行规定》、DB44/T 703—2010《外掺氧化镁混凝土不分横缝拱坝技术导则》、DB52/T 720—2010《全坝外掺氧化镁混凝土拱坝技术规范》) 相关规定和要求外, 还要特别重视以下问题:

6.1 设计方面

常规柱状浇筑法与整体通仓浇筑法在设计上的最大差别是对施工期的混凝土水化热温度荷载的处理: ①设计计算方法上, 常规柱状浇筑法在封拱前的温度荷载, 仅对各自坝块产生变形与应力, 不参加拱梁分载法的变位调整; 而整体通仓浇筑法的温度荷载要参加拱梁分载法的变位调整; ②温度应力控制指标的含义不同, 常规柱状浇筑法温度应力的控制按 $\sigma \leq \varepsilon_p E_c / k_f$ 确定 (ε_p 为混凝土的极限拉伸值; E_c 为混凝土的弹性模量; k_f 为安全系数) 整体通仓浇筑法的温度应力控制指标应包括施工期的温度影响。除对温度荷载的处理不同外, 两种方法的不同点还体现在外掺 MgO 混凝土自生体积膨胀变形的影响上, 它贯穿施工期、运行期整个过程, 设计时必须考虑这种影响。此外, 在设计理念上也有创新: 从传统的控制设计工况、参数的设计方法, 发展到考虑动态因素的仿真分析设计来确定拱坝布置、体形方案和施工浇筑方案等。设计实例可参考 DB44/T 703—2010《外掺氧化镁混凝土不分横缝拱坝技术导则》中的计算方法部分。

6.2 试验方面

外掺 MgO 混凝土材料试验是实施外掺 MgO 混凝土快速筑坝技术的基础, 必须提前进行。应高度

重视以下问题:①优选水泥品种及各种原材料;②优选设计混凝土的施工配合比,目的是要配制出抗拉强度高、变形能力较强、绝热温升较低的低弹高强混凝土;③必须进行压蒸试验,可参照规范 DB44/T 703—2010 或 DB52/T 720—2010 进行试验;④必须进行混凝土自生体积变形试验(应考虑不同温度的影响);⑤提出满足温控设计要求的自生体积变形膨胀量和相应的 MgO 膨胀剂的安全掺量。

6.3 施工方面

①外掺 MgO 混凝土快速筑坝技术实行通仓连续快速浇筑混凝土,因此必须选择高质量的机械设备,要能够承受高强度运行工艺要求;②必须保证外掺 MgO 的均匀性,以确保混凝土体积安定性和长期运行安全性,实现设计要求的膨胀补偿效应,外掺 MgO 混凝土均匀性质量标准以机口指标为准;③除满足补偿膨胀量外,在抗裂能力上要求优于常规混凝土,应采取综合措施,优化施工混凝土配合比;④坝体温度场影响膨胀量,所以要强调保温、保湿和养护工作的重要性,以减小内外温差,防止表面裂缝或贯穿性裂缝,预防寒潮袭击时产生过大的温度梯度而导致混凝土降温速度减慢,从而有利于充分发挥膨胀补偿作用;⑤必须严格控制原材料质量和准确的拌和时间(不少于 4 min)及稳定的坍落度(3~5 cm),必须先平仓后振捣。施工中必须建立质量保证体系,尤其要特别重视加强适时监控管理,对混凝土拌制、运输、浇筑等全过程进行严格的质量控制管理。要充分认识到施工是关键,这都是确保工程质量的关键所在,要做到精心组织、精密施工。

6.4 MgO 的外掺方式及均匀性

膨胀水泥的制备目前主要是通过内含和外掺两种方法来实现的。

6.4.1 内含高镁水泥

在有高镁石灰石或白云石矿源的水泥厂,有条件采用矿渣或钢渣配料并掺扩化剂后,适当调整煅烧温度和配方时,可提高生料中的 MgO 含量,直接烧制成高含氧化镁的水泥, MgO 掺量可在 5% 以内,经过压蒸试验合格可放宽到 6%。采用这种方法可改变水泥的性质,有一定的膨胀量但较小,它解决不了温控问题。由于原材料的均匀性难控制,水泥产品的稳定性可能较差。

6.4.2 外掺 MgO 水泥

可在工地拌和楼机口外掺 MgO,也可在水泥厂外掺 MgO。

a. 工地拌和楼机口外掺 MgO 可分为干掺与水掺、内掺与外掺。为了确保均匀性及准确可靠,最好配备配制机具和自动化控制系统,必须加强适时监

控管理。

b. 在水泥厂外掺 MgO 可分为共磨法和共混法两种。①共磨法按设计掺量将 MgO 半成品和水泥熟料一起入磨共同粉磨成高含 MgO 的水泥。大型工程采用水泥厂外掺优于在工地外掺,优点是掺量准确、可靠、均匀性好,是确保产品质量的有效方法,又可大大减轻施工现场的工作量。②共混法采用粉状合格的 MgO 产品与水泥产品一起投入混和机共同混合成高镁水泥,可在水泥厂混和,也可在工地混和。该方法能保证 MgO 材料的粒度不变化,但要确保其均匀性较难。

c. 采用外掺法均要求水泥中的 MgO 含量越低越好(<1% 或 <1.5%),需要强调的是,一律不用叠加法(即不计水泥中的 MgO),其标准均以自生体积变形量为准。

6.4.3 外掺 MgO 的均匀性

应建立储存 MgO 材料的干燥库,在采用机具外掺自动化控制条件下,必须建立和健全质量保证体系,加强适时巡视监控管理。制定具体保证措施,要求称量准确、灵敏,掺入准确,每班必须校核计量系统,严格执行规定拌和时间(一般 4~5 min),这是确保拌和均匀的关键。

可参照规范 DB52/T 720—2010 中的有关规定进行 MgO 均匀性的快速检测。外掺 MgO 混凝土均匀性质量标准以机口指标为准,仓面浇筑层少量的验证均匀性检测还是需要的,可取少量几组作验证性检测(共磨法可省去此项工作)。

6.5 MgO 膨胀剂的质量

a. MgO 膨胀剂的质量按 WJM: 0035—1994《水利水电工程轻烧氧化镁材料品质技术要求》的规定控制。具体物化指标为:①MgO 的质量分数应大于或等于 90%;②活性指标为(240±20) s;③CaO 质量分数小于 2%;④细度 180 孔目/in(0.080 mm 标准筛,1 in=2.54 cm),筛余量小于或等于 3%(即 0.06~0.08 mm,对应 250~180 目);⑤烧失量小于或等于 4%;⑥SiO₂ 质量分数小于 4%。煅烧温度为(1100±50)℃,保温时间为 0.5 h。

b. 关于生产厂家的要求:①应采用部定点生产厂家产品(如辽宁海城析木镇东方滑镁公司),不得用非定点厂家产品;②应采用规模大的厂家产品(如辽宁海城牌楼镇牌楼镁矿公司,规模大,产品多,技术力量强,目前出口的非水工用产品的活性指标为 224 s, MgO 质量分数大于 91%,细度 300 目的占 95% 以上,具有开发价值);③若将旋窑与立窑产品比较,旋窑入窑矿粒小、煅烧均匀、温度控制准确,产品质量的稳定性和膨胀量均优于立窑产品;④从总结工程应

用效果看,需继续深入 MgO 膨胀材料的研究工作,设法使其膨胀性能完全满足水工混凝土的要求^[24]。

7 结 语

本文通过对外掺 MgO 混凝土快速筑坝技术的基本理论、补偿原理、实现方法及施工技术等方面的对比分析,论述了外掺 MgO 混凝土快速筑坝技术的特点以及该技术与传统柱状法的主要区别,并指出在设计、施工、试验、坝体保温和均匀性快速检测等工作中应当重视的问题。通过总结大量研究结果,阐明了 MgO 材料的基本特性、完全水化膨胀的条件和影响因素以及在水泥中的膨胀机理,全面介绍了外掺 MgO 混凝土的基本物理力学与变形性能、自生体积膨胀变形的特点和规律以及对仿真计算的影响,同时扼要介绍了工程应用情况、应用条件以及技术经济效益。在目前西部大开发、“西电东送”及国家优先开发水电的大好形势下,我国西南丰富的水利资源必将得到充分开发利用,外掺 MgO 混凝土快速筑坝技术必将在我国水电工程建设中发挥巨大的作用。

参考文献:

- [1] 李承木. MgO 混凝土自生体积变形的长期研究成果[J]. 水力发电, 1998(6): 53-57. (LI Chengmu. Study on the self-volume deformation of MgO concrete [J]. Water Power, 1998(6): 53-57. (in Chinese))
- [2] 李承木. 外掺 MgO 混凝土的基本力学与长期耐久性能[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(5): 30-35. (LI Chengmu. Basic mechanics and long-term durability of concrete mixed with MgO [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000, 20(5): 30-35. (in Chinese))
- [3] 陈其武, 李晓新. 氧化镁混凝土筑坝技术文集[C]. 北京: 水利水电规划设计总局, 1994.
- [4] 李承木, 袁明道. 外掺 MgO 微膨胀混凝土筑坝技术应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(6): 57-63. (LI Chengmu, YUAN Mingdao. Application of the dams construction by MgO concrete with gentle volume expansion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(6): 57-63. (in Chinese))
- [5] 李承木, 李万军. 外掺 MgO 混凝土快速筑拱坝技术及其应用[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(6): 41-45. (LI Chengmu, LI Wanjun. Application of fast damming technology admixed with MgO expansive concrete in arch dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(6): 41-45. (in Chinese))
- [6] 刘振威. 外掺 MgO 混凝土不分横缝快速筑拱坝新技术应用研究成果总报告[R]. 广州: 广东省水利厅, 2005.
- [7] 朱伯芳. 论微膨胀混凝土筑坝技术[J]. 水力发电学报, 2000(3): 1-13. (ZHU Bofang. On construction of dams by concrete with gentle volume expansion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000(3): 1-13. (in Chinese))
- [8] 李承木. 外掺重烧和轻烧 MgO 水泥净浆试体的膨胀性能[J]. 水电工程研究, 1998(4): 7-11. (LI Chengmu. Expansion properties of re-burning and light burned mixed with MgO cement paste specimens [J]. Hydropower Engineering Research, 1998(4): 7-11. (in Chinese))
- [9] 李承木, 李万军. 论氧化镁膨胀材料的品质质量及膨胀性能[J]. 水电站设计, 2005(3): 95-99. (LI Chengmu, LI Wanjun. Discussion on quality & expansiveness of expansive material-magnesium oxide [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2005(3): 95-99. (in Chinese))
- [10] 李承木, 李晓勇, 陈学茂. 压蒸条件对外掺 MgO 水泥砂浆和混凝土压蒸膨胀率的影响[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(5): 24-28. (LI Chengmu, LI Xiaoyong, CHEN Xuemao. Influence of pressure-braise system on the pressure-braise expansion ratio of concrete and cement mortar mixed with MgO [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(5): 24-28. (in Chinese))
- [11] 金红伟. 混凝土中外掺氧化镁安定掺量的研究[J]. 混凝土, 2001(7): 30-33. (JIN Hongwei. Research of admixed oxide of magnesium safe quantity in the concrete [J]. Concrete, 2001(7): 30-33. (in Chinese))
- [12] 李承木, 陈学茂, 李晓勇. 关于外掺 MgO 混凝土压蒸安定性试验的几个问题[J]. 广东水利水电, 2009(6): 1-4. (LI Chengmu, CHEN Xuemao, LI Xiaoyong. Some problems related to autoclave stability test of concrete mixed magnesia [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2009(6): 1-4. (in Chinese))
- [13] 李万军, 李晓勇, 陈学茂, 等. 外掺 MgO 混凝土压蒸安定性试验方法的探讨[J]. 水电站设计, 2010(1): 67-71. (LI Wanjun, LI Xiaoyong, CHEN Xuemao, et al. Probing into admixed MgO concrete autoclave soundness test method [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2010(1): 67-71. (in Chinese))
- [14] 丁宝瑛, 岳耀真, 朱绛. 掺 MgO 膨胀混凝土的温度徐变应力分析[C]//丁宝瑛. 大体积混凝土结构的温度应力与温度控制论文集. 北京: 兵器工业出版社, 1991: 382-390.
- [15] 李承木. 不同试验温度条件下 MgO 混凝土的自生体积变形研究[J]. 水电工程研究, 1998(3): 1-9. (LI Chengmu. Study on the self-volume deformation of MgO concrete under different test temperature conditions [J]. Hydropower Engineering Research, 1998(3): 1-9. (in Chinese))
- [16] 邓敏, 崔雪华, 唐明述. 水泥中氧化镁的膨胀机理[R]. 南京: 南京化工学院, 1989.
- [17] 李承木, 陈学茂. 外掺 MgO 混凝土基本力学性能的温度效应[J]. 水力发电, 2006(8): 31-33. (LI Chengmu, CHEN Xuemao. Temperature effect test of mechanics property of concrete mixed with MgO [J]. Water Power, 2006(8): 31-33. (in Chinese))

2006(8):31-33. (in Chinese)

- [18] 蔡为武. 白山拱坝钻孔取芯试验成果分析与探讨[J]. 水电站设计, 1998(1): 77-82. (CAI Weiwu. Test result analysis and discussion on boring for core at baishan arch dam [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1998(1): 77-82. 97. (in Chinese))
- [19] 李承木. MgO 混凝土自生体积变形的长期试验研究成果[J]. 水力发电学报, 1999(2): 11-19. (LI Chengmu. An experimental study of the autogenous volume deformation of the MgO concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999(2): 11-19. (in Chinese))
- [20] 袁明道, 李承木, 扬光华. MgO 微膨胀混凝土自生体积变形的长期温度效应研究与仿真计算模型的探讨[C]//第18届(2002年度)科研成果学术论文报告文集. 广州: 广东省水利水电科学研究院, 2003: 214-223.
- [21] 李承木. MgO 微膨胀混凝土的基本性能研究[C]//陈其武, 李晓新. 氧化镁混凝土筑坝技术文集. 北京: 水

利水电规划设计总院, 1994: 46-68.

- [22] 李承木. 铜头拱坝外掺氧化镁混凝土的基本性能研究[C]//铜头拱坝建设文集. 成都: 水利水电混凝土坝信息网, 2004: 71-84.
- [23] 李晓勇, 李万军, 李承木. 关于对混凝土压蒸安定性试验若干影响因素的研究[J]. 水电站设计, 2013(1): 104-109. (LI Xiaoyong, LI Wanjun, LI Chengmu. Study of several factors affecting concrete compression steaming stability testing [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2013(1): 104-109. (in Chinese))
- [24] 李承木. 论我国 MgO 混凝土筑坝技术的发展历史与现状[J]. 广东水利水电, 2012(9): 1-7. (LI Chengmu. Development and status of MgO concrete dam technology [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2012(9): 1-7. (in Chinese))
- (收稿日期: 2012-10-15 编辑: 熊水斌)

(上接第 14 页)

- [11] 姚成, 纪益秋, 李致家, 等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 42-47. (YAO Cheng, JI Yiqiu, LI Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(1): 42-47. (in Chinese))
- [12] YAO Cheng, LI Zhijia, YU Zhongbo, et al. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xinanjiang model using geographically based information [J]. Journal of Hydrology, 2012, 468/469: 47-62.
- [13] ANDERSON R, KOREN V, REED S. Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates [J]. Journal of Hydrology, 2006, 320: 103-106.

- [14] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [15] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6): 2-9. (ZHAO Renjun, WANG Peilan. Analysis of the parameters of the Xinanjiang model [J]. Journal of China Hydrology, 1988(6): 2-9. (in Chinese))
- [16] KOREN V, SMITH M, WANG D, et al. Use of soil property data in the derivation of conceptual rainfall-runoff model parameters [C]//Proceedings of the 15th Conference on Hydrology. Long Beach: AMS, 2000: 103-106.
- [17] 中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台. SRTM 90 米分辨率数字高程原始数据 [EB/OL]. [2012-09-28]. <http://datamirror.csdb.cn>. (收稿日期: 2012-11-28 编辑: 熊水斌)

(上接第 76 页)

- [6] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33: 379-392.
- [7] THOMAS H R, HE Y. Coupled heat-moisture transfer theory for deformable unsaturated soil and its algorithmic implementation [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40(18): 3421-3441.
- [8] WONG T T, FREDLUND D G, KRAHN J. Numerical study of coupled consolidation in unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 926-937.
- [9] 路为, 白冰, 陈从新. 岩质顺层边坡的平面滑移破坏机制分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 204-207. (LU Wei, BAI Bing, CHEN Congxin. Analysis of mechanism of plane sliding failure for bedded rock slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 204-207. (in Chinese))
- [10] 荣冠, 王思敬, 王恩志, 等. 强降雨下元磨公路典型工程边坡稳定性研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27

- (4): 704-711. (RONG Guan, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. Stability analysis of yuanmo highway slope under intensive rainfall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 704-711. (in Chinese))
- [11] 戚国庆, 黄润秋, 速宝玉, 等. 岩质边坡降雨入渗过程的数值模拟[J]. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(4): 625-629. (QI Guoqing, HUANG Runqiu, SU Baoyu, et al. Numeric simulation on rainfall infiltration on rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 625-629. (in Chinese))
- [12] 刘俊新, 刘育田, 胡启军. 非饱和地表径流-渗流和流固耦合条件下降雨入渗对路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 903-910. (LIU Junxin, LIU Yutian, HU Qijun. Stability of embankment slope subjected to rainfall infiltration considering both runoff-underground seepage and fluid-solid coupling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 903-910. (in Chinese))
- (收稿日期: 2012-10-15 编辑: 熊水斌)