

中国水力发电工程学会施工专业委员会
中国水电顾问集团成都勘测设计研究院

编

水工大坝 混凝土材料和温度控制 研究与进展

王仁坤 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国水力发电工程学会施工专业委员会
中国水电顾问集团成都勘测设计研究院

编

水工大坝 混凝土材料和温度控制 研究与进展

王仁坤 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (C I P) 数据

水工大坝混凝土材料和温度控制研究与进展 / 王仁坤主编 ; 中国水力发电工程学会施工专业委员会, 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院编. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2009. 11

ISBN 978-7-5084-6948-5

I. ①水… II. ①王… ②中… ③中… III. ①大坝—水工材料—混凝土—温度控制—文集 IV. ①TV431-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第202318号

书 名	水工大坝混凝土材料和温度控制研究与进展
作 者	中国水力发电工程学会施工专业委员会 编 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院 编 王仁坤 主编
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 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	北京市地矿印刷厂
规 格	210mm×285mm 16 开本 28.5 印张 843 千字
版 次	2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷
印 数	0001—2500 册
定 价	85.00 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

前 言

水工大坝混凝土在施工期和运行期,除承受结构自重、水压力等外部荷载外,还要承受由于混凝土本身体积变化而引起的荷载,这中间主要是来源于混凝土受约束时热变化导致的体积变化而引起的温度应力。在水工大体积混凝土中,水泥因水化而发热,热量从表面散发,所以在混凝土中产生温度梯度,靠近表面的梯度最大。观测表明,由此温度梯度导致的高应力足以使大体积混凝土内部产生贯通性裂缝。在大多数混凝土大坝中,温度应力等于或甚至高于水荷载作用的工作应力。因此对水工大坝混凝土进行温度控制以防止由于温度应力而引起混凝土的开裂就成为水工大坝的设计者和建设者十分关注的问题。

混凝土产生温度裂缝的实质就是混凝土自身的抗裂能力和由于温度变化所引起拉应力相抗衡的结果。因此防止大坝混凝土温度裂缝的产生就包括两个方面:一是提高大坝混凝土自身的抗裂能力。它主要通过选用发热量低且有微膨胀特性的水泥、掺用活性掺合料和适宜的外加剂、选择优质的骨料以及优化大坝混凝土的配合比等措施来实现。二是对大坝混凝土结构进行温度控制设计。大坝混凝土的温控设计既要根据地理位置、混凝土浇筑季节以及混凝土自身的性能指标因地制宜地确定标准与选择措施,又要考虑施工能力和进度等以期达到经济有效地控制混凝土温度,达到防止裂缝的目的。

中国是世界上水力资源最丰富的国家,其中80%的水力资源集中在西部地区。近年来在我国西部大开发和西电东送战略的推动下,一批大型和特大型的水利水电工程相继开工建设,水电建设达到了前所未有的高潮。我国的水电建设的技术达到世界的领先水平,在水工大坝混凝土材料的选择以及温度控制的领域中也有着许多突破性的进展,取得了大量可喜的成就,积累了一大批成功经验。为此,中国水力发电工程学会施工专业委员会与中国水电顾问集团成都勘测设计研究院联合主办,中国水利水电第七工程局有限公司协办,于2009年7月6~9日在成都召开了“水工大坝混凝土材料与温度控制学术交流会”。会议主要交流和研讨的内容为:大坝混凝土原材料的选择和质量控制标准;大坝混凝土温控设计及温控施工工艺;大坝混凝土的抗裂性、耐久性以及长期性能;大坝混凝土新型掺合料的开发与应用;高坝

混凝土骨料种类的选择；混凝土骨料生产工艺与创新；高拱坝、高碾压混凝土坝全级配混凝土的特性和安全复核。

会上，中国水力发电工程学会常务副理事长兼秘书长李菊根介绍了目前我国水电发展的形势；谭靖夷院士对我国水工大坝混凝土材料以及水工大坝混凝土温度控制的发展进行了点评。

会议征集了80余篇论文，内容涉及水工混凝土材料和温度控制的各个方面，充分反映了近几年我国水利水电工程混凝土材料和温控专业的发展状况和动向，充分体现了混凝土材料和温控专业在工程建设中所做出的成绩。施工专委会组织审稿专家组对征集的论文进行了认真的审阅，部分论文因与征稿内容相距较远未予选入，最终选择了70篇论文编入本次论文集。需要说明的是，本着文责自负的原则，编者只对文章中明显的错误进行了修改，基本保持论文的原貌。此外，由于时间比较仓促，疏漏之处在所难免，敬请作者谅解并请提出宝贵意见。

编 者

2009年10月

谭靖夷院士在“水工大坝混凝土材料与温度控制学术交流会”上的发言

一、关于大坝混凝土材料

砂石骨料占大坝混凝土质量的 80%~85% 以上,是混凝土的主体。骨料的物理、化学和力学性能及其级配、粒形和成分等都是影响混凝土强度、弹性模量、线膨胀系数、极限拉伸值、单位用水量以及是否存在碱活性的最重要因素。

20 世纪 70 年代前,我国水工混凝土以天然骨料为主,自贵州乌江渡较大规模成功采用灰岩人工砂石骨料后(年生产能力 200 万 t),随着水电建设重心逐步向西南、西北地区转移,人工骨料的规模日益扩大。按就地或就近取材原则,人工骨料所利用的原岩由单一灰岩向花岗岩、片麻岩、正长岩、砂岩等扩展,现已多达十余个品种。

人工砂石骨料的新发展主要体现在以下几方面:

(1) 为满足高强度等级、高性能混凝土质量要求,降低单位用水量并适应碾压混凝土坝的发展,对骨料级配、粒形、砂细度模数、含水量、细料($\leq 0.08\text{mm}$)含量等提出更高的要求,产品质量稳定。

(2) 三峡、小湾、溪洛渡等工程大量利用工程开挖料作为骨料料源,云南大朝山工程 100% 利用玄武岩开挖料,有利于保护环境和节约能源。

(3) 溪洛渡水电站工程地面和地下开挖工程量巨大,利用玄武岩开挖料为骨料料源,但总量仍不足,而坝址区有灰岩可资利用。经充分试验研究,确定采用以玄武岩为粗骨料,灰岩为细骨料的组合骨料。与全玄武岩骨料比较,既发挥了玄武岩高强度的优势,又降低了混凝土线膨胀系数,减小了混凝土自生体积收缩变形,还降低了制砂的成本。采用组合骨料是人工骨料创新之举。

(4) 重视碱活性骨料反应。锦屏一级水电站砂岩骨料有较强的碱硅酸反应,为确保工程长期安全,除控制混凝土总碱量并加大粉煤灰掺量予以抑制外,还克服困难,改用大理岩为细骨料,既保持了高强度砂岩作为混凝土骨架的优势,又进一步消除了混凝土碱活性膨胀的后患,降低了混凝土线膨胀系数,使锦屏一级水电站成为采用组合骨料的又一特高拱坝。向家坝水电站原拟用距坝址较近的白云质灰岩为骨料料源,但经详查该灰岩有碱碳酸盐反应,为此不惜代价,舍近求远,改用公路距离 50km 以外的纯灰岩,以总长 31km 的胶带机输送半成品料至坝区砂石加工系统,这又是一个创举。改用纯灰岩后,由于混凝土单位用水量小,线膨胀系数低,干缩小,轴心抗拉强度高,极限拉伸值也较高,提高了混凝土的抗裂性能。

改革开放促进电力工业的大发展,全国大规模基本建设和大型水利水电工程建设促进了各种建筑材料尤其是水泥、粉煤灰和各种外加剂的发展和商品化。其主要特点为:

(1) 为满足高拱坝、高碾压混凝土坝对混凝土强度、耐久性、抗裂能力不断提高的要求,在建材市场货源充足的条件下,经过配合比的优化,生产出以低用水量、小水胶比、高掺量 I 级粉煤灰、适用于高坝的高性能混凝土,并建成了一大批高混凝土坝,其中有代表性的为:高 240m 的二滩拱坝;最大底宽达 168m 通仓浇筑的龙滩高碾压混凝土坝;经大地震考验迄今未发现裂缝的沙牌碾压混凝土拱坝。此外,还促进了以粉煤灰为主的掺合料料源多样化,磷、锰矿渣粉、凝灰岩粉、石灰石粉都用作掺合料。

(2) 为满足抗裂要求,外掺和内含 MgO 延迟性微膨胀混凝土也应运而生,但其发展还不尽如人意,例如有的工程混凝土自生体积变形呈现偏大的后期收缩,影响其抗裂能力。

(3) 生产出能满足抗渗和抗冻要求的碾压混凝土,实现了高坝的全断面碾压。具有高含气量稳定

性,可满足高抗冻要求($\geq F300$)的混凝土也有了初步试验结果。

(4)高面板堆石坝的混凝土防渗和防裂问题,通过控制坝体变形、优化混凝土配合比、掺膨胀剂或纤维等也取得了预期效果。

应该指出,高掺Ⅰ级以及优质粉煤灰,不但可减小混凝土用水量,提高其后期强度和密实性,也减小了干缩,加大了早期徐变,延缓了水泥放热速率,有利于混凝土削峰降温 and 温度控制,但同时也加大了剩余水化热。如果措施不当,将因混凝土内部温度回升而恶化温度应力,应予以重视。

在混凝土配合比和材料优选方面取得的上述丰富成果来之不易,是各科研试验单位和各高等院校长期试验研究、辛勤劳动和集体智慧的结晶,应倍加珍惜并继续努力前进。

二、关于大坝混凝土温度控制

自20世纪50年代兴建了一批100m级高混凝土坝以来,经过50年的工程实践,在混凝土温度控制方面已积累了丰富的经验,并建立了行之有效的温度控制标准,与之相应的温度徐变应力计算已从最初的约束系数法、影响线法,经过逐步完善,发展到有限元法和仿真分析。

除在材料方面尽可能采取有利于温控防裂的措施并已取得丰富成果外,现在通行的主要温控手段首先是骨料预冷。各大型工程多采用两次风冷,并加强大骨料的冷却,效果较好。经拌和加片冰进一步冷却后,大型工程混凝土出机口温度可降低至 7°C 左右。在使用缆机浇筑混凝土的条件下,控制浇筑温度的主要手段是仓面喷雾保湿降温 and 及时覆盖。坝内一、二期水管冷却已基本规范化。一期冷却在削减温峰并继续适当降低坝内温度后,一般停止冷却。有的工程为防止出现第二次温峰或温度回升,还进行中期保温冷却。部分工程在入冬前将坝内偏高温降至 $20\sim 22^{\circ}\text{C}$,以免在低温季节出现过大的内外温差。但这些冷却措施并未形成规范化要求,而是由各工程自行规定。二期冷却一般在接缝灌浆前至少一个月开始,要求均匀降温至设计稳定温度并达到规定龄期,如龄期不够,允许适当超冷予以补偿。二期冷却区高度一般为灌浆区高度加不小于6m的同冷层,灌浆区高度 $8\sim 15\text{m}$,因工程而异。采取上述温控措施的混凝土大坝,工程质量基本正常,虽也出现过一些裂缝,但与冷却分期和分区无关。

坝内冷却现多采用集装箱化的移动式冷水机组,并大量采用塑料冷却水管。近年来为控制坝内最高温度,高碾压混凝土坝也用冷却水管进行坝内冷却。与此同时,各工程还加强了混凝土的养护,尤其重视冬季混凝土表面保温,各大工程主要采用聚苯乙烯板贴面保温效果显著。

对于通仓浇筑特高厚拱坝(300m级)的温度控制,主要谈二点看法:

(1)中期冷却。中期冷却含一期冷却结束到二期冷却开始的全过程,一般不少于60d,如无内外热源介入,在这段时间停止冷却,可充分利用徐变使温度应力松弛,然后再开始二期冷却,既可简化温控程序,又有利于防裂。上层混凝土温度倒灌难以避免,其影响范围为其下层混凝土的浅表层,适当延长一期冷却时间可以缓解。因大石未冷透而引起温度回升,可能影响坝内最高温度并加重削峰冷却负荷,应尽力防止。但在高掺粉煤灰(30%~35%)的条件下,由于水化放热速率趋缓。据工程实测数据,剩余水化热(包括粉煤灰水化热)可使坝内温度缓慢回升 $4\sim 6^{\circ}\text{C}$ 以上。从而显著加大了二期冷却降温幅度,对温控防裂十分不利。因此有必要进行中期冷却,在二期冷却前将剩余水化热温度回升消除于无形,并可适当降温,冷却可采用间歇性通水方式。如无特殊情况,这应成为高掺粉煤灰或其他掺合料混凝土拱坝的共同要求。

(2)二期冷却区高度。现行灌浆区加不小于6m同冷区的二期冷却区高度,对灌浆区较高($12\sim 15\text{m}$)和底宽不太大(例如 $40\sim 50\text{m}$)且有中期冷却的高拱坝影响尚不太严重,但如最大底宽大于60m时,将难以承受。通仓浇筑的特高厚拱坝下部已冷却到稳定温度的坝体,由于厚度大龄期长,弹模高,刚度大,对上部混凝土的约束程度大于一般地基,坝体灌缝成拱后约束更强。因此应视下部坝体为地基,同时,上部待冷却的混凝土因内温较高,还将构成双向约束。

为此,在一般情况下,如将灌浆区高度设定为 $9\sim 12\text{m}$,其上的同冷区高度应不小于1~2倍灌浆

区高度，同冷区之上再设不小于 1 倍灌区高度的过渡层，使二期冷却区总高度达到 0.4 倍最大底宽，即脱离约束的高度，再上为盖重层，即在底宽较大的拱坝高度范围内均为约束区，摆脱传统的自由区观念，但二期冷却区总高度可随坝底宽的减小相应逐步调整。这就是特高厚拱坝有别于一般高拱坝的主要特点。其温度控制标准包括允许基础温差，坝内允许最高温度同基础约束区，过渡区温度可取一期与二期冷却终温的平均值。工程实践表明，采取上述措施后，特高厚拱坝的防裂问题可得到有效控制。还应指出，上述二期冷却区高度的增大，并不额外加重冷却负荷。只要灌区高度保持不变，每新增一个灌浆区，只需相应向上增加一个灌区高度的二期冷却区，但对已冷却至稳定温度的灌区，需控温 and 保温。

最后必须指出，防止裂缝的产生，只是温度控制的基本要求。由于混凝土抗裂安全系数留的余地较小，而且在混凝土抗裂方面还存在一些不确定因素，因此还应在施工管理、冷却制度、冷却工艺等方面采取有效措施，以“小温差、早冷却、慢冷却”为指导思想，尽可能减小冷却降温过程中的温度梯度和温差，以降低温度徐变应力。此外，还要加强表面保温，使大坝具有较大的实际抗裂安全度。

李菊根常务副理事长在“水工大坝混凝土材料与温度控制学术交流会”上的讲话

尊敬的各位领导、专家和代表：上午好！

欢迎大家来到成都，参加中国水力发电工程学会施工专业委员会和中国水电顾问集团成都勘测设计研究院联合主办的“水工大坝混凝土材料与温度控制交流会”，重点就西部地区的水电建设在各种复杂环境条件下，对水工大坝混凝土材料及温度控制遇到的各种新课题和面临的挑战进行广泛的交流和专题研讨。首先，我代表学会对会议的召开表示热烈的祝贺！对协办单位中国水利水电第七工程局有限公司给予学会和专委会工作的大力支持，以及为本次会议所付出的辛勤劳动和热情服务表示衷心的感谢！

进入 21 世纪，我国各方面都取得了举世公认的伟大成就，但也面临着更加严峻的困难和挑战，我国人口多，底子薄，资源人均占有量较低的状况没有根本改变，防洪安全、供水安全、粮食安全、能源安全、生态环境等问题依然十分突出。我国水能资源世界第一，但水电开发的程度远远低于发达国家水平，大力开发水电是我国能源可持续发展不可或缺的重要途径。近几年我国水电发展比较快，截至 2008 年底全国水电总装机容量达到 1.72 亿 kW，其中包括 5000 多万 kW 的小水电。在这 1.72 亿 kW 当中凝聚着大家的智慧结晶和辛勤劳动，因为坝工工程是我们整个水电站建设的核心部分，而能否保证我们的电站大坝建设成为千百年的安全工程，施工过程的质量控制至关重要。今天我们所要共同探讨的关于大坝混凝土材料与温度控制问题，就是确保我们的施工质量中十分重要的环节。

自从去年由美国次贷危机而引发全球金融危机以来，中央采取了一系列宏观调控和拉动内需的措施，但水电开发不在此列。近两年来，虽然我国年新增水电装机均达到了千万级千瓦的水平，但是国家对大中型水电的核准速度却放缓了，2007 年被国家核准的大中型水电才 270 万 kW，而 2008 年国家更是未核准一个大中型常规水电站开工建设，不过目前在建规模仍然超过了 7000 万 kW。所以说当前水电建设所面临的形势并不是太好，但是从长远来看，水电作为近几十年最具开发潜力、最能替代一次性能源的清洁可再生能源中的重要地位不会根本改变，水电依然具有巨大的发展空间。2003 年我们复查出的水能资源技术可开发总量约 5.4 亿 kW，经济可开发总量约 4.02 亿 kW，国家规划到 2020 年建成 3 亿 kW 的常规水电装机容量，另外还规划了约 4000 万 kW 的抽水蓄能，现在水电已经建成了 1.72 亿 kW，我想经过我们水电工作者近二三十年的努力奋斗，4.02 亿 kW 的水能资源是可以开发出来的。当然，风能和太阳能作为近年来新崛起的可再生清洁能源，发展潜力也十分巨大，但目前受技术、成本高昂以及入网有难度等限制，真正大规模开发应用还需时日。我国的风能蕴藏量达 12 亿 kW，自 2003 年我国开展大型风电建设前期工作以来，我国风电建设得到了快速发展，装机容量年均增长率达到 70% 以上，至 2008 年底我国风电装机容量达到了 1217 万 kW，其中已并网发电的风电机组容量为 939 万 kW，我国风电装机容量世界排名由 2007 年的第五名升至第四名。发展太阳能的潜力也很大，我国西北一望无际的大沙漠就具有很好的太阳能资源，戈壁滩 1km² 就可以发展 5 万 kW 的太阳能电站，所以说我国的太阳能资源还是相当丰富的。

当前我国的水电形势不容乐观，水电发展也确实遇到了一些问题，大家也可能存在着一些忧虑，这也属正常。当前世界经济要发展，中国经济也要发展，一个必然引出的问题是能源的发展。能源的发展离不开水电的开发，但由于我国人口多，又是农业大国，水电发展淹没土地比较多，淹没的森林植被也比较广，因此水电的开发必然会引出环保和移民两大问题，制约着水电的开发。但是希望大家认识到，从世界能源的发展来看，我们要减少污染，减少温室气体排放，必须大力发展新能源，这始终是为全球全人类所共识并主动承担的主要任务，所以水能资源作为重要的清洁可再生能源，一定会得到长远的可持续的发展，大家一定要对这一点充满信心。水电开发应坚持“优化开发，有序开发，

选择性开发，在保护中开发、在开发中保护”等原则，切实要把生态环保问题重视起来，建设中尽量少开山辟路，少占用耕地，实施精细化管理，确确实实做到边开发边保护，这样我们才能达到人与自然的和谐共处，才能理直气壮地在公众面前表明我们是“在保护环境基础上有序开发水电”的立场。另外一个突出的问题就是移民，解决这个问题一定要政府重视、投资者支持、群众配合，各方相互协作才行，移民后期扶持政策一定要认真落实到位。这也需要我们大力开展好相关舆论宣传工作，现在有不少人从狭隘的角度看问题，鼓吹建电站筑大坝的不利影响，到处制造水电开发的不利舆论，误导少数人，使我们在环保和移民上处于被动局面，值得我们认真对待，也对我们水电界提出了新的问题和要求。我们要认真学习和实践科学发展观，做好本职工作，化被动为主动，大力开展舆论宣传和科普宣传工作，还公众以事实真相，利用好学会“中国水电网”，促进人与自然的和谐发展，真正做到“建设一座电站，振兴一方经济，富裕一批人民，保护一片环境”，把我们的水电事业不断推向前进，为国家的能源战略安全，为全面建设小康社会作出我们应有的贡献。

借此机会，也应加强我们之间的联系，构建起学会与各会员单位之间，专委会与勘测设计、施工建设、设备制造、生产运行、科研院所等行业企业单位之间的紧密联系和交流沟通。学会作为一个行业的学术团体，为大家搭建好学术交流和科研咨询服务的平台，今年学会秘书处是在周大兵理事长的领导下，做了或正在开展一些工作，在这里我挑主要的简单介绍一下：

一是召开了“第二届水力发电技术国际会议”。二是在“5·12”汶川地震一周年之际组织召开了“全国水工抗震防灾学术交流会”。三是召开了“六届三次理事会”。四是受国家发展和改革委员会的委托，组织编制了《全国水电发展年度报告》，现在补编 2008 年度的，并筹备编制 2009 年度的，每年一期。五是以迎来新中国成立 60 周年之契机，学会在理事长的领导下，正努力编写《中国水电 60 年》，全面展示新中国成立 60 年来我国水电建设的辉煌成就和宝贵经验。希望在座的各单位也给予大力支持，尽量给我们提供信息资料，共同把 60 周年的中国水电发展史编写好。六是正在积极争取设立“水力发电科技进步奖”，明年正式投入运作，潘家铮水电科技基金的收益能够充分地支撑我们水电科技进步奖的奖励。七是流域公司的发展是学会工作的基础，十三大水电路域基地占了全国水电容量的 70% 左右。周大兵理事长要求学会的下一步工作基点，就是应当紧紧地依靠各大流域公司，大力宣传流域滚动开发，为流域开发服好务，促进流域公司取得更大的效益。今年学会将组织一次流域公司经营管理者恳谈会，也邀请各大发电公司主管水电的领导同志出席，好好地研究一下我们的生产管理课题，尤其是流域梯级调度，充分利用好水力资源，使各方都受益。八是学会与中国水利水电科学研究院和四川大学能源研究中心建立了长期合作关系，优化整合资源，调动专家和科研优势，共同推动我国的水电科学技术向前发展。九是学会建立了“中国水电网”，从今年 4 月运行至今，社会反响不错。通过网站我们实现了大型会议的网络直播，同时为 32 个专业委员会留了窗口，希望大家能够积极利用中国水电网这个平台，切实把我们的宣传工作搞上去。这里要注意三点：一要和中央保持一致；二不要进行人身攻击；三要多宣传可再生能源的大好形势。

今天，我们施工专业委员会在这里组织召开“水工大坝混凝土材料与温度控制交流会”，围绕西部地区水电建设时间紧、地质条件复杂、工程规模大、环境条件恶劣等不利条件下，就水工大坝混凝土材料及温度控制面临的新课题和新挑战，进行广泛的交流和探讨，希望各位专家和代表畅所欲言，群策群力，为更好地推进西部大开发、推动西电东送战略的顺利实施，也是为更好地开发西部水电资源而贡献我们的智慧。在这里也非常感谢院士、专委会主任和秘书长对专委会工作的热衷和投入，把专委会运作得这么好。同时感谢各位专家和代表对专委会工作的大力支持。

最后，祝本次会议圆满成功！祝各位专家和代表身体健康，家庭幸福，在成都度过愉快美好的短暂几天！

谢谢大家！

目 录

前言

谭靖夷院士在“水工大坝混凝土材料与温度控制学术交流会”上的发言

李菊根常务副理事长在“水工大坝混凝土材料与温度控制学术交流会”上的讲话

第一部分 大坝混凝土材料研究

高拱坝混凝土人工骨料的选择	李光伟	(3)
大坝混凝土材料的研究进展	陈改新	(13)
混凝土新型掺合料的研究与应用	方坤河	(24)
温度—应力试验在水工混凝土抗裂性研究中的应用	蔡跃波 丁建彤 陈 波	(31)
混凝土耐久性浅析	甄永严	(37)
论水工混凝土的抗裂性	黄国兴	(41)
对“论水工混凝土的抗裂性”一文的答复与商榷	方坤河	(48)
水泥品质与混凝土开裂的关系	杨华全 苏 杰 周世华 董 芸	(50)
粉煤灰品质对水泥抗裂性的影响	周世华 苏 杰 董 芸 杨华全	(56)
高拱坝混凝土性能试验及其真值探讨	肖延亮	(60)
不同养护方式对掺粉煤灰大坝混凝土强度发展的影响	钱文勋 张燕迟 蔡跃波 丁建彤	(64)
锦屏一级水电站大坝混凝土的碱骨料反应	李光伟 周麒雯	(68)
向家坝水电站砂石骨料的选择与应用	姚运德 顾功开	(75)
龙开口水电站白云岩骨料碾压混凝土性能研究	李新宇 梅龙喜 费伯军	(83)
玄武岩骨料碾压混凝土特性分析	田育功	(89)
锦屏一级水电站大奔流沟砂岩碱活性抑制试验研究	李鹏翔 苏 杰 杨华全	(97)
龙开口水电站工程混凝土骨料选择试验研究	田军涛 王秀军	(104)
石粉作为掺合料对碾压混凝土性能的影响	田承宇	(111)
若干因素对大坝混凝土自生体积变形测值的影响	欧阳幼玲 陈迅捷 丁建彤 张燕驰	(117)
骨料品种对混凝土体积变形特性的影响研究	李家正 石 妍 苏 杰	(121)
骨料裹粉对混凝土性能影响及应对措施	梁力平 周政国	(126)
骨料优化配制对混凝土抗裂性的影响	陈迅捷 欧阳幼玲 钱文勋 张燕驰	(137)
浅谈天然砂、人工砂与 RCC 配合比设计试验及其应用	罗纬邦 高居生	(142)
骨料品质对 HF 混凝土性能的影响	甘莉芬 师毓强	(148)
大体积磷渣混凝土变形特性研究	曾 力 吴定燕 方坤河 陈 霞 戈雪良 阮 燕	(152)
测试设备及率定方式对混凝土绝热温升试验的影响	丁建彤 高欣欣 安普斌	(158)
三峡工程三期围堰碾压混凝土中粉煤灰水化热计算研究	陈文耀 肖兴恒	(163)
水泥—粉煤灰—石灰石粉三元胶凝体系性能及水化机理研究	董 芸 肖开涛 苏 杰	(168)

混凝土中水泥水化模型的分析	孙明伦	雷爱中	(175)
长江三峡三期工程混凝土配合比试验研究与质量控制	王保法	曹周生 窦立刚	(182)
小湾水电站主体工程混凝土配合比试验研究与质量控制	王保法	窦立刚 康志明	(189)
龙滩水电站大法坪砂石加工系统生产过程中砂的质量控制		李学莉	(197)
蔡系高效减水剂后掺法在察汗乌苏水电站混凝土施工中的研究和应用	李明世	李世凯	(203)
高效缓凝减水剂在碾压混凝土高温季节施工中的应用	吴湘建	谢世佑	(208)
金安桥水电站碾压混凝土原材料特性及应用	康小春	李 伟	(213)
拉西瓦高寒地区影响混凝土抗冻性因素及改善措施	施正友	王 煊	(219)
保持高抗冻碾压混凝土含气量的试验研究	高建山 谢林苗	陈平华 张国慧	(225)
四级配碾压混凝土拌和物性能试验研究		吴元东	(230)
复掺纤维对面板混凝土性能的影响	严建军	彭尚仕 苏 杰	(233)
钢纤维喷混凝土的室内湿喷试验研究	石 妍 杨华全	李家正 林育强 王仲华	(238)
泵送钢纤维混凝土在彭水电站引水洞下弯管段中的应用	韩章良	吕玉娥 夏海霞	(243)
自密实混凝土在厂房蜗壳施工中的应用	雷登宪	胡建立 雷 宏	(249)
人工砂石骨料拌制混凝土泌水现象的探讨	胡建立	雷登宪	(252)
缺乏优质料源的水电工程混凝土材料的比选及成本分析	冯 炜 孙国胜	陈改新	(255)

第二部分 大坝混凝土温控研究

溪洛渡拱坝混凝土施工温度控制设计	王仁坤	尹华安 张 冲	(263)
特高拱坝温控防裂问题再议	张国新 艾永平	刘有志 刘 毅	(275)
高拱坝裂缝成因关键问题研究 ... 黄淑萍 艾永平 王向东 张志超 凌 骐 迟建军		曾为成	(287)
黄河拉西瓦水电站工程双曲拱坝混凝土温控仿真研究	雷丽萍	黄天润 郭红彦	(298)
黄河拉西瓦水电站混凝土双曲拱坝温控防裂问题探讨	胡 平 杨 萍	张国新	(307)
锦屏一级水电站拱坝混凝土的抗裂性分析	程念生	覃祥健	(317)
锦屏一级双曲拱坝混凝土温控和防裂施工工艺研究		李 文	(322)
龙滩高碾压混凝土重力坝温控防裂问题的研究		林鸿镁	(328)
马吉拱坝大坝混凝土温控仿真计算研究	张怀芝	段大琪	(339)
沙牌碾压混凝土拱坝温控抗裂效果优异原因的探讨	钟永江	赵永刚	(345)
特高拱坝温度应力仿真与温度控制的几个问题探讨	张国新 解 敏	赵文光 向 弘	(351)
对六个高拱坝混凝土温控防裂设计的反思		程念生	(357)
混凝土全级配与湿筛试验参数差别对温度应力计算的影响	刘 毅 张国新 刘有志 解 敏	陈改新	(362)
拱坝灌浆冷却高度和水温对温度应力的影响研究	刘 毅 张国新 尹华安 赵丽娜	刘 玉	(368)
锦屏一级水电站双曲拱坝混凝土通水冷却工艺研究		李 文	(374)
生长连接模型在龙滩水电站温控仿真分析中的应用	彭文明	段云岭 杜效鹤	(380)
三峡右岸电站厂房浇筑过程仿真计算分析	徐跃之	陈 琴	(390)
三峡工程厂房坝段纵缝接触问题研究	崔建华	苏海东	(394)

用 ANSYS 估算混凝土自生体积变形应力	程念生	黄志澎	(399)
大坝混凝土中期冷却温度应力计算	程念生	赵永刚	(404)
三峡右岸厂房 17 号坝段混凝土性态监测及分析	汪运星	冯 俊	(408)
三峡右岸厂房坝段温度应力仿真计算分析	徐跃之	祁勇峰	(414)
气温骤降对高面板堆石坝面板应力的影响	陈 琴	徐跃之	陕 亮
碾压混凝土高拱坝设计的关键技术问题		陈秋华	(423)
三峡工程左岸 98.7m 高程混凝土预冷系统风冷粗骨料运行情况简析		李裕营	(429)
溪洛渡水电站中心场混凝土生产系统预冷混凝土设计简介	韩章良	刘 伟	赵双凤
碾压混凝土高温施工技术措施	于润明	宋建军	冷继菊

第一部分

大坝混凝土材料研究



高拱坝混凝土人工骨料的选择

李光伟

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院)

【摘 要】 骨料是混凝土的主要组成材料,骨料的品质对拱坝混凝土的技术性能及经济效益均产生重要影响。本文结合溪洛渡水电站及锦屏一级水电站的实际,对人工骨料的强度特性、耐久特性以及热力学特性等对拱坝混凝土性能的影响进行了试验研究,对溪洛渡水电站及锦屏一级水电站拱坝混凝土人工骨料的选择进行了一定的分析和探讨。

【关键词】 人工骨料 强度特性 耐久特性 热力学特性 拱坝混凝土 选择

1 前言

由于拱坝具有优良的力学性能和造价的经济性,全世界已建坝高超过 15m 的拱坝有近 2000 座,其中中国约有 800 座。随着西部的大开发,使得拱坝特别是高拱坝在水电工程中得以大量应用,其中已建和在建坝高为 300m 级的高拱坝就有二滩、小湾、溪洛渡和锦屏一级等。由于骨料是混凝土的主要组成材料,在水工大体积混凝土中骨料的重量约占混凝土的 85% 左右,骨料的品质对混凝土的技术性能及经济效益均产生重要影响。

目前水电工程所在河段大多地处深山峡谷,河流坡降较陡,推移质承受较大的启动流速,即使上游有充足的补给区,砂砾也不能沉积形成,天然骨料缺乏充足的资源。水电工程只能考虑利用当地天然岩石,用机械破碎的方法制造成人工骨料。选择性能优良的人工骨料是保证拱坝大体积混凝土具有良好的耐久性能以及高抗裂能力的先决条件。因此在拱坝大体积混凝土设计时,必须结合工程区域的实际情况,对用于拱坝混凝土的人工骨料的种类进行认真的选择。

2 人工骨料原岩选择的原则

人工骨料的原岩按岩石的地质成因分类,可以分成火成岩、沉积岩和变质岩。大部分的火成岩都是优良的骨料原料,沉积岩变化范围较大,变质岩则介于火成岩和沉积岩之间。人工骨料原岩的选择时应充分考虑如下因素:①岩石应新鲜未经风化,致密且坚硬;②岩石节理和解理极少,岩石呈厚层,较少夹层充填和岩脉充填;③岩石组织致密,细粒或微粒,不等粒结晶,结构完整或很少裂隙次生充填胶结;④岩石的化学组成均匀变化小且无有害物质等。

3 人工骨料的基本特性

人工骨料的基本特性直接影响着所配制混凝土的性能,对于水工大体积混凝土而言,人工骨料最重要的特性是强度特性、耐久特性以及热力学特性等。

3.1 人工骨料的强度特性

人工骨料的强度特性主要取决于其矿物组成、结构致密性、质地均匀性以及物化性能的稳定性等。人工骨料的强度一般都要高于混凝土的设计强度，这是因为骨料在混凝土中主要起骨架作用，在承受荷载时骨料的应力会大大超过混凝土的抗压强度。目前一般采用岩石强度、压碎指标以及跌落损失等指标评价人工骨料的强度特性。

3.1.1 岩石强度

岩石强度一般采用立方体或圆柱体试样测得，通常要求岩石强度与混凝土的强度之比不应小于 1.5。一般说来，火成岩的岩石强度不宜低于 80MPa，变质岩的岩石强度不宜低于 60MPa，沉积岩的岩石强度不宜低于 30MPa。

采用溪洛渡水电站当地的玄武岩、角砾熔岩和灰岩加工成人工骨料配制的混凝土强度与人工骨料岩石强度的关系见图 1。采用锦屏一级水电站当地的大理岩加工成人工骨料配制的混凝土强度与人工骨料岩石强度之间的关系见图 2^[2]。由图 1 和图 2 可以看出：在相同条件下，随着人工骨料的岩石强度增加，混凝土的强度将提高。

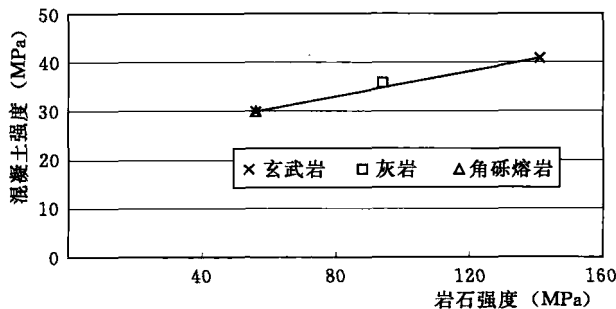


图 1 不同岩性人工骨料岩石强度与混凝土强度之间的关系

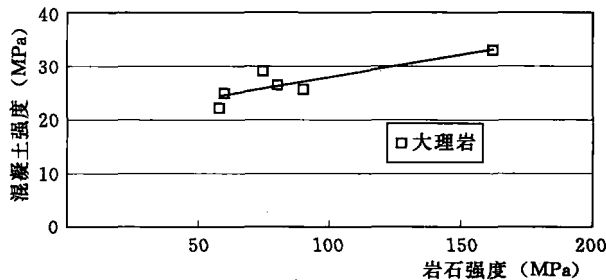


图 2 同一岩性人工骨料岩石强度与混凝土强度之间的关系

3.1.2 骨料的压碎指标

由于岩石强度试验具有加工复杂、强度变异性较大，不能代表骨料在混凝土中的真正受力状态的不足，因此采用骨料的压碎指标来评价骨料的强度特性。骨料的压碎指标是以粒径为 10~20mm 的骨料，装在直径为 152mm 的圆筒内，捣实后加压 200kN，压碎的小于 2.5mm 细颗粒部分重量百分比。

采用溪洛渡水电站当地的玄武岩以及锦屏一级水电站当地的大理岩加工成人工骨料进行的骨料压碎指标试验结果见图 3。试验结果表明：骨料压碎指标值与岩石强度之间有着很好的相关关系，即随

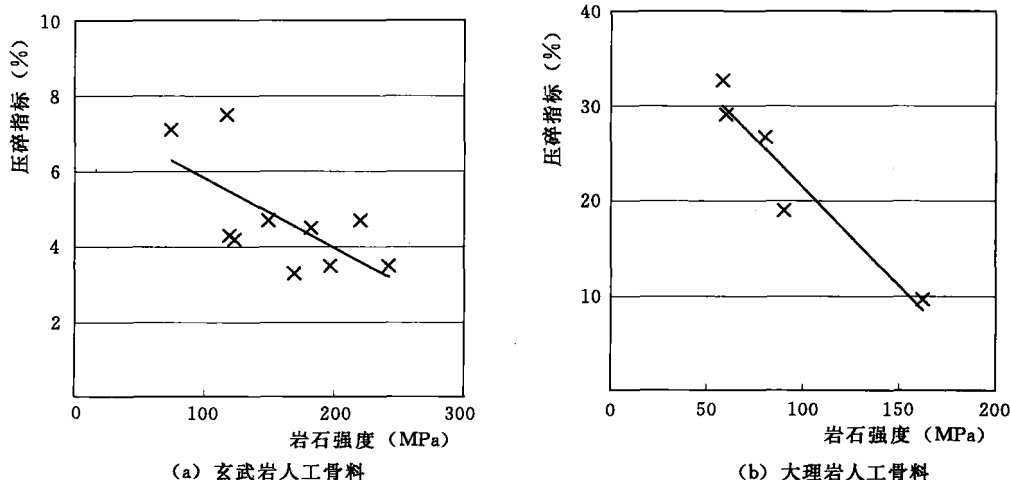


图 3 骨料压碎指标与岩石强度之间的关系