

水电工程 砂石骨料生产技术

*Aggregate Production Technology of
Hydropower Engineering*

赵小青 王章忠 冯钧 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

水电工程 砂石骨料生产技术

*Aggregate Production Technology of
Hydropower Engineering*

赵小青 王章忠 冯钧 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

水电工程砂石骨料生产技术/赵小青,王章忠,冯钧编著. —武汉: 武汉大学出版社, 2013. 4

ISBN 978-7-307-10534-8

I. 水… II. ①赵… ②王… ③冯… III. 水利水电工程—混凝土—骨料—生产技术 IV. TV544

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 039143 号

责任编辑:林 莉 责任校对:黄添生 版式设计:马 佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 武汉中远印务有限公司

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 19 字数: 448 千字 插页: 2

版次: 2013 年 4 月第 1 版 2013 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-10534-8/TV · 36 定价: 48.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

序

2010年，受湖北省科技厅的委托，我作为专家鉴定委员会主任委员，主持了省科技厅对葛洲坝集团第五工程有限公司的科技项目《水电工程砂石骨料新型工艺研究与应用》的成果鉴定。会上，通过他们的介绍，才知道葛洲坝五公司是一家专业从事水电工程砂石骨料生产的建筑施工企业。葛洲坝五公司不仅参加了三峡、龙滩、溪落渡、锦屏、瀑布沟、藏木、亭子口、景洪等20多项国家特大型、大型水电工程的建设，还结合工程建设需要，研究开发了一套水电工程砂石骨料生产技术，稳稳地走在水电工程砂石骨料生产技术领域的前列。

葛洲坝五公司在锦屏一级水电站印把子砂石加工系统的大奔流沟料场开采中，克服狭窄、高陡复杂地形地质情况带来的重重困难，通过螺旋式“明道改暗洞”的方式，创造性地凿出了10公里长的螺旋式地下隧道，形成“之”字形降段开采道路；通过“溜井—平洞运输”的半成品长距离运输输送方式，将开采石料通过溜井直接送到布置在地下的砂石加工系统，首次在水电行业实现了200米以上斜井运输，单段溜井长度达到277米，斜度 77° ，开采高差达513米，解决了高陡、狭窄等复杂地形条件下，300米级单段垂直转运的关键技术问题，攻克了被谭靖夷院士称为“世界级难题”的大奔流沟料场石料开采、垂直转运的难题；通过采用“反击破粗级整形+四段破碎+筛孔数量调整”新工艺，解决了特大石针片状含量超标的难题，保证了锦屏一级电站建设的砂石骨料供应。葛洲坝五公司研究的包括上述技术在内的研究成果，在2010年被湖北省科技厅聘请的专家鉴定委员会鉴定为达到国际先进水平，其中高陡狭窄复杂条件下石料开采运输技术等达到国际领先水平，给我留下了深刻印象。

同年，我又受湖北省科技厅的委托，参加了对葛洲坝五公司“建设粒料绿色制备工程技术研究中心”申报省级工程技术研究中心认定的专家评审会，我清楚地记得五公司以其“砂石科学研究所”为基础，组建的建设粒料绿色制备工程技术研究中心，被湖北省科技厅认定为湖北省工程技术研究中心，这是当时水电施工企业首个被认定为省级工程技术研究中心的工程中心，也给我留下了深刻印象。

2013年3月，葛洲坝五公司总工程师王章忠同志，带着他们公司赵小青总经理等编著的《水电工程砂石骨料生产技术》书稿，到学校找我，想请我给他们的文集写个序，我有感于他们立足国家水电建设，勇于探索水电工程砂石骨料生产技术科学高峰的这种钻研精神，仔细翻阅他们这个册子，写下了这些话。

葛洲坝五公司在这个册子里，以40余篇数据翔实、经验独到的技术论文，从天然砂石骨料生产、人工砂石骨料生产、废水处理、生产设备与供配电等多方面，介绍了葛洲坝五公司立足国家重大水电工程建设，围绕企业生产经营，几十年如一日，坚持开展企业技

术创新，取得的丰硕技术成果。从文中可以看到，经他们设计承建的水电工程砂石骨料加工系统，早已可以不受工程地质条件的限制，生产骨料的母岩不仅能用龙滩的灰岩、三峡的花岗岩、溪落渡的玄武岩，还可以用锦屏工程大奔流沟料场的变质石英砂岩、锦屏三滩料场的大理岩，真正实现了母岩等料源来源的多样性；人工制砂在锦屏三滩用风力选粉机实现了大理岩制砂过量石粉的分离，取得了干法环保制砂的大跨越；亭子口更是实现了天然卵石硬岩制砂、制石粉的重大突破，满足了水电工程混凝土用砂、碾压混凝土用砂的需要，真正实现了砂石骨料生产过程的环保性。

翻阅这个册子，总的感觉是基本展示了葛洲坝五公司在高陡、狭窄地形地质条件下，石料开采深溜井垂直转运技术，天然卵石硬岩制粉生产碾压混凝土用砂技术，风力磁选全干法制砂环保控制等新技术和“预处理+一次沉淀+机械脱水”废水处理以及“反击破粗级整形+四段破碎+筛孔数量调整”新工艺等的应用成果，可以说代表了我国水电行业混凝土砂石骨料生产技术的最新水平。不难预计该书的出版，必将为推动中国乃至世界水电工程砂石骨料生产技术的发展发挥积极的作用，同时也将促进我国水电工程混凝土砂石骨料生产技术的快速进步。

衷心祝愿葛洲坝五公司继续发扬高度重视企业技术创新的传统，在水电工程混凝土砂石骨料生产技术领域取得更大成就。

中国工程院 院士



2013年3月于武汉

前 言

葛洲坝集团第五工程有限公司以“石头”起家，从建设葛洲坝时期的三三〇砂石分局起步，专业从事砂石骨料的开采、加工生产，在近 40 年的发展中，五公司积极探索水电站混凝土砂石骨料生产技术，先后承担了三峡工程古树岭加工系统、龙滩水电站大法坪砂石加工系统、亭子口水利枢纽左岸砂石加工骨料系统、溪洛渡水电站大坝人工骨料加工系统、锦屏一级水电站三滩、印把子人工砂石加工系统、藏木水电站砂石拌和系统等 20 多项国家特大型、大型水电站混凝土砂石骨料加工系统的设计、建设与运行的任务，取得多项行业领先的技术成果。2010 年，经湖北省科技厅组织有关专家委员会鉴定，葛洲坝五公司在砂石骨料生产技术领域的研究成果整体达到国际先进水平，其中高陡狭窄复杂地形地质条件下石料开采、深溜井垂直转运技术等达到国际领先水平。研究成果《水电工程砂石骨料新型工艺研究与应用》被评为湖北省科技进步二等奖。

五公司高度重视砂石骨料生产技术的研究与创新，坚持理论联系实际，积极推动校企合作，构建以企业为主体、大学等研究机构与企业紧密联合的产学研”科技创新体系，在砂石系统设计、建设及运行管理方面积累了丰富的经验，多年来获得省部级科技进步奖 7 项，葛洲坝集团科技进步奖 33 项，取得重大科技成果 35 项，获得国家专利授权 130 项；其中仅砂石骨料生产技术方面，就获得省部级科技进步奖 5 项，葛洲坝集团科技进步奖 7 项，取得重大科技成果 12 项，获得国家专利授权 32 项。

2010 年以公司“砂石科学研究所”为主体组建的建设粒料绿色制备工程技术研究中心，被湖北省科技厅认定为湖北省工程技术研究中心，这也是当时水电施工企业第一个省级工程技术研究中心。经过近 40 年持续技术创新的积累，葛洲坝五公司已成为中国水电砂石第一品牌。

五公司以承建的龙滩大法坪、溪洛渡、锦屏一级、亭子口等国家重大水电工程砂石骨料生产系统为依托，研究和开发了针对不同地形、地质条件下水电站高品质、大强度混凝土砂石骨料生产技术；开展了水电工程混凝土砂石骨料生产技术的研究和四新技术的应用；发明了高陡、狭窄地形地质条件下石料开采深溜井垂直转运技术、全干法制砂质量与环保控制技术、天然卵石硬岩制粉生产碾压混凝土用砂技术；在水电工程混凝土骨料生产技术领域取得了丰硕成果，有力推动了水电站混凝土砂石骨料生产技术的进步。

在五公司的发展历史中，砂石骨料生产一直是公司的核心支柱产业。其中，五公司承建运营的三峡古树岭人工砂石系统处理能力为 2650t/h，月产量达 76.2 万吨，为当时国内最大的人工砂石系统；龙滩大法坪砂石加工系统扩容后处理能力达 2750t/h，为当时国内最大的人工砂石系统；三峡右岸高家溪砂石系统处理能力为 2000t/h，为当时国内最大的天然砂石系统。五公司的砂石骨料生产技术随着公司的发展不断取得跨越和进步，承建运

营的四川亭子口水利枢纽左岸砂石加工骨料系统，每小时可处理砂石骨料 2000 吨，首创了天然硬质卵石制砂制粉技术，成为亚洲最大的天然卵石硬岩制砂加工系统，已成为中国水电人的骄傲。

在三峡古树岭加工系统的建设运行过程中，五公司优化加工工艺设计，充分挖掘专业物料碎磨设备性能，率先引进当时世界最大功率的诺德伯格圆锥破碎机，一举解决了三峡工程混凝土砂石骨料针片状含量超标的难题；将选矿学的理论和方法引入到水电行业，历时 3 年，对三峡古树岭闪云斜长花岗岩弃料再利用进行研究，开发了人工砂游离云母的分离与脱除工艺，成功将砂中游离云母的含量从 12% 降至 2% 以下。

五公司在龙滩大法坪砂石系统建设运行中，针对料场最高开采强度达 45 万立方米，道路条件差，料场与系统高差约 300 米，传统的石料爆破——挖装——汽车运输工艺，因资源一次性投入大、成本高、道路适应性差，难以满足高强度混凝土生产需要，经充分分析研究料场地形地质条件，在料场与系统 300 米高差的山坡间，利用天然地形设多层台阶转料仓，将原设计 280 米竖井改成“多台阶转料仓+80 米竖井+大型移动式破碎站+移动式胶带机”的方式，进行砂石骨料生产，解决了开采石料垂直运输的难题，实现了砂石骨料生产开采石料水平运输和垂直运输的完美结合，不仅生产成本降低了一半，还节约了土地资源，减少了环境污染，取得了良好的社会经济效益。

五公司在砂石骨料水下开采水上制备技术方面，也取得了突破性进展。在云南景洪水电站天然砂石料生产系统中，由于澜沧江流速较大，河床切割较深，采砂船挖掘受到链斗长度的限制，挖掘效果较差，特别是细骨料受流速影响获得率低。针对此种情况，公司对开采方式及时进行调整，大胆引进港口航道疏浚技术，并利用自身在船舶制造方面的优势，自行设计制造了三艘自行式射流吸沙船，配合索铲在河挖取天然砂石料，不仅减少了细骨料流失，还针对水下开采，原料含水量大，采取预先脱水工艺，保证了骨料含水率符合要求，取得了良好的效果。

在锦屏一级水电站印把子沟人工砂石骨料系统生产中，大奔流沟料场地形坡度为 $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$ ，骨料开采要在海拔 2000 多米的高边坡上层层剥离，节节下降，降段高差达 513 米，场地狭窄，环境恶劣，其施工难度为中国水电砂石系统料场开采所罕见，被中国工程院谭靖夷院士称为“世界级难题”。在不可能形成露天道路的前提条件下，将开采降段道路由“明道改暗洞”，由约 10 公里的地下洞室群组成，石料采用长度 280m、倾角 77° 的长斜井转运，井下直接布置大型旋回破碎机，半成品料长距离皮带运输的料场开采和输送技术，首次在水电行业实现了石料 300 米级斜井运输，开采高差达 513 米，单井处理能力首次达到 2000 吨/小时，解决了被谭靖夷院士称为“世界级难题”的锦屏大奔流沟料场降段开采难题。首创了高陡、狭窄等复杂地形地质条件下，降段开采石料“明道改暗洞+深溜井”运输，半成品长皮带机输送；加工系统根据分段破碎工艺需要，依山坡地形台阶布置，粗碎车间大旋回破碎机以埋入式直接布置在井下的地上地下空间立体生产布置形式。

人工砂生产是砂石骨料生产中技术含量最高、难度最大的关键环节，一般的湿法生产废水排量大，石粉回收困难；干法生产粉尘污染难以控制，严重影响生态环境。五公司在锦屏水电站三滩砂石骨料生产系统中敢为人先，全部采用全环保干法工艺生产，系统耗水

量不足 0.1 立方米/吨。系统结合风选工艺首次采用封闭与喷雾降尘、机械除尘相结合的方式，有效减小了噪音和粉尘污染，最大限度地节约了水资源，既有效消除了湿法生产的石粉流失量大的难题，又实现了人工砂石骨料全干法全流程环保生产，集成研发了分级制砂的干法制砂工艺和硬岩制砂的新工艺，提高了砂料品质，成功地将石粉含量控制在 6%~18% 之间的任意值，含水率控制在 6% 以内，细度模数控制在 2.4~2.8 之间，有效地解决了人工砂干法生产工艺石粉含量、含水率、细度模数等指标的波动问题，减少了用水用地，节约了工程成本。

天然卵石制备石粉生产碾压混凝土用砂是五公司水电工程骨料生产新型工艺研究成果的一个重要组成部分。随着我国一些特大型水电站陆续开工建设，高掺石粉的碾压混凝土对成品砂石粉含量指标提出了更高的要求。公司承建的亭子口水电站砂石加工系统，毛料通过采砂船取自河床，细骨料含量低。为满足碾压混凝土对含粉率的要求，公司突破传统制砂设备选型范畴，引进水泥行业制粉技术，首次采用细腔型圆锥破碎机和中速 T 型磨粉机的组合工艺，进行天然卵石制砂和制粉，解决了传统制砂设备耐磨配件消耗快的问题，保证了生产碾压混凝土优质砂所需石粉含量及稳定性方面的要求，提高了制砂率，实现了水泥行业制粉技术和水电行业砂石系统天然卵石硬岩制石粉生产碾压混凝土用砂的有机结合，首创了砂石系统天然卵石硬岩制备石粉生产碾压混凝土用砂的技术。

五公司与时俱进，在砂石骨料生产中引进最新科技成果。在亭子口左岸砂石系统工程中，建立了信息化管理，对砂石加工系统实行全工区信息化管理，即以电子计算机计量软件为载体，配以摄像头、监控器等硬件设施，建立了覆盖全作业区、全过程、全方位监管的现代化电子科技管理系统，公司还率先将现场总线技术的 ASRi（自动设置调节—智能化）智能控制系统应用于对大型破碎设备的控制，实现了大型砂石加工设备的自动化控制，减轻了操作人员在恶劣工作环境中的操作压力，降低了设备的事故率。同时，ASRi 控制系统为更精确地监控设备主要耐磨配件的磨损情况，最大程度地提高磨耗件利用率，起到了有效降本增效、堵塞漏洞的作用，进一步丰富了精细化管理的内涵，极大提升了利润空间。

砂石骨料系统废水处理问题是水电行业砂石加工的老大难环保问题，公司不断探索，在总结研究龙滩、锦屏一级、溪洛渡等大型水电工程砂石骨料生产系统废水处理经验的基础上，发明了废水处理预处理系统。通过旋流和机械脱水设备减轻后续工序处理负荷，解决了渣浆泵及输浆管道堵塞、废水沉淀和泥浆脱水等难题，实现了骨料快速脱水和废水回收的全流程环保，保证了系统正常运行；废水处理完全满足系统生产用水水质要求，实现了砂石加工系统废水处理达标再利用和废渣零排放的标准。溪洛渡砂石加工系统废水处理项目获得了业主单位三峡集团公司的好评，被树为水电站砂石加工系统废水处理样板工程。

“海到尽头天作岸，山登绝顶我为峰。”五公司砂石骨料品牌在市场的磨砺中不断成熟，在实践的检验下更加自信。葛洲坝五公司砂石品牌永不会止步，在未来的水电工程砂石骨料生产领域，五公司人将积极向砂石系统智能控制、远程监控领域拓展，向环境保护和节能减排等技术领域拓展，向新能源的利用领域拓展，实现中国水电工程砂石骨料生产技术的更大跨越，五公司人将以领跑者的姿态，行进在世界水电砂石骨料生产领域的发展

大道上。

本书是五公司在砂石骨料生产技术多年创新成果的概括和总结，是全体五公司人智慧的结晶。在本书的编撰过程中，兰芳、王祖军、罗作仟、张建花、张海艳、齐涛、刘嫦、杨金华等参加了部分文章的搜集、整理等工作，在此一并表示感谢！徐强、丁纯、刘必要、禹宗贵、张建花、文杰、杨懿等参加了随书出版的《中国砂石骨料生产技术的领跑者》专题片的编制工作，胡清新、吕芝林、朱显山、文杰、兰芳等参加了专题片的审稿工作，在此一并表示感谢！中国能源建设集团公司副总经理兼总工程师周厚贵博士，在百忙之中为本书分章，对部分章节名称乃至部分文章的标题都亲自进行了斧正，在此表示衷心感谢！中国工程院院士张勇传教授在百忙之中为本书作序，在此致以特别的谢意！

由于作者水平有限，对水电工程砂石骨料生产技术的创新或可取之处的集纳难免挂一漏万，加之编撰时间较为仓促，书中难免存在不当或错误之处，真诚希望专家、同行和读者不吝指正。

编 者

2013 年 2 月于湖北宜昌

目 录

一、综 述

水电工程砂石骨料生产技术综述	付俊雄	朱显山	(3)
砂石骨料生产技术创新与应用	赵小青	王章忠	(8)
天然砂石骨料生产技术的新进展	赵小青	兰 芳	王章忠 (12)

二、天然砂石骨料生产

亭子口水电站左岸砂石加工系统	彭元平	王文涛	(21)
亭子口左岸砂石加工系统扩容改造	张建花	文 杰	谭文东 (28)
向家坝水电站天然砂石料生产的级配调整及质量控制	何 芹	路银山	(35)
天然硬质卵石制备碾压混凝土用砂的工艺措施	王文涛	文 杰	文 科 (41)
GPS、测深仪在天然料水下开采中的应用	丁桂生	李耿凯	(46)

三、人工砂石骨料生产

锦屏水电站变质石英砂岩生产特大石问题的探讨	朱显山	(53)
锦屏水电站变质砂岩粗骨料整形工艺研究	王嘉禄 宁金华 冯 钧 付艳艳	(60)
锦屏水电站大奔流沟料场边坡稳定性研究反馈应用	罗作仟 王祖军 张钊	(68)
锦屏水电站大奔流沟开挖料运输方案比选研究	冯 钧 罗作仟 贾平洋	(76)
锦屏水电站大奔流沟料场开采石料运输与开采道路 布置方案的研究	沈桂基 段绍辉 王祖军	(83)
砂石骨料生产长距离运输线设计研究	冯 钧 兰 芳	(90)
锦屏水电站料场洞室群规划布置	朱显山	(97)
锦屏水电站大奔流沟料场井下设备布置参数的确定	李 杉 朱显山	(104)
锦屏水电站三滩大理岩砂石系统的规划和设计	齐拥军 秦明 白 晶	(111)
瀑布沟水电站反滤料加工系统的设计与调整	任玉勇	(118)
硐室爆破技术在人工砂石加工系统毛料开采中的应用	朱辉煌	(127)
广西红水河龙滩水电站大法坪砂石加工系统	赵小青 齐 涛	(133)
四川锦屏水电站印把子砂石加工系统	赵小青 罗作仟	(139)
四川锦屏水电站三滩砂石加工系统	秦 明 齐拥军	(152)

四、废水处理

砂石骨料生产废水处理系统的设计与运行	章尚贵 杨小东 朱辉煌 (165)
龙滩工程大法坪砂石加工系统废水处理技术	兰 芳 (170)
藏木砂石供水系统斜管沉淀池排泥系统改造	张建花 谢建明 刘 宏 (176)

五、生产设备与供配电

砂石加工系统供配电设计	李炳松 (183)
砂石加工系统电气设计	兰 芳 (193)
砂石废水处理压滤设备的应用	章尚贵 (199)
选粉机在三滩砂石加工系统中的应用	秦明 刘漫远 齐拥军 邹宏超 (205)
圆筒洗石机设备改造	齐 涛 刘 镇 (212)
石粉回收设备在大法坪砂石加工系统中的应用	李学莉 (219)
移动式破碎站机在大法坪的应用	齐 涛 (228)
不同材质筛网在砂石系统预筛中的使用比较	何庆良 (239)

六、系统运行管理

锦屏水电站砂石加工系统布置与优化	赵小青 罗作仟 (247)
三峡工程古树岭人工砂石骨料生产技术	兰 芳 (252)
龙滩水电站大法坪砂石加工系统综述	赵小青 李学莉 朱显山 陈舜海 (258)
硬质岩工程利用料生产人工粗骨料的质量控制	张国翠 (273)
龙滩工程大法坪砂石加工系统人工砂质量控制	兰 芳 (283)
砂石系统设计阶段造价控制	兰 芳 (288)

一、综 述

水电工程砂石骨料生产技术综述

付俊雄 朱显山

(葛洲坝集团第五工程有限公司, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 水电工程骨料生产系统是大坝的“粮仓”, 随着筑坝技术的发展, 骨料生产系统在大坝施工各控制环节中所占的比重也越来越大。本文结合水电站骨料生产系统中料场规划、系统工艺和环境保护等重点环节展开探讨, 结合目前国内已经完建和在建工程的料场开采及运输技术、工艺流程、设备选择、污水处理、粉尘和噪音控制等领域的技术发展和应用情况进行剖析, 同时对我国水电站骨料生产系统的技术发展趋势进行了展望。

关键词: 骨料 系统 技术 现状 展望

1 前言

骨料生产系统广泛用于道路、水电、工民建、铁路、核电等各建筑领域, 系统组成一般由毛料采运、成品加工、成品运输及辅助设施等环节组成。我国属于水电能源蕴藏量较为丰富的国家, 随着国家近 20 年来对水电开发力度的加大, 骨料生产系统在水电领域由于规模大、总量多、品种繁杂、料源复杂等因素的影响, 其发展速度进入了一个新的水平, 被称为“大坝粮仓”。系统依据料源不同可分为天然骨料生产系统和人工骨料生产系统, 天然骨料生产系统早在 20 世纪 50 年代后期开始于丹江口大坝工程, 人工骨料生产系统最早 50 年代中期开始于映秀湾工程, 经过五十多年在各自领域取得突飞猛进的高速发展。本文主要依托水电站的骨料生产系统进行论述。

2 毛料采运

2.1 天然料开采和运输

天然砂石骨料受料源分布的影响较大, 一般分为陆地料场、河滩料场和河床料场。前二者与人工系统的料场开采差距不大, 且难度远低于人工料场的开采。河床开采(也称为水下开采)经过几十年发展, 技术变化并不明显, 一般采用采砂船配备自卸式驳船和拖轮配备的驳船进行运输, 毛料级配的控制一般采用事先勘测和操作人员现场进行控制, 运输能力则受河道的水深、流速和设备制造能力的影响较大。20 世纪 50 年代丹江口工程

受汉江河道的影响,设备配置以 150m^3 驳船运输为主,2007 年大坝加高工程仍然只能采用此种模式。20 世纪 70 年代的长江葛洲坝工程,受当时的船舶制造水平的限制,采用 300m^3 的驳船配备日本进口的 $750\text{m}^3/\text{h}$ 的采砂船,而在 1994 年的三峡前期工程中,则采用了 1000m^3 砂驳与 $750\text{m}^3/\text{h}$ 的采砂船联合采运的方式,其运输效率得以大幅度提高,因此,水下采运必须将采区的运输条件和装备制造水平进行有机结合。

尽管水下开采在采掘运输方式上仍然以传统方式为主流,但在设备的种类选择上也在逐渐进行改进和突破。云南景洪水电站心滩天然料生产系统前期仍然采用传统方式进行骨料开采和转运,由于澜沧江流速较大,河床切割较深,采砂船挖掘受到链斗长度的限制,挖掘效果较差,特别是细骨料受流速影响获得率低,针对此种情况,项目部对开采方式及时进行了调整,大胆引进港口航道疏浚技术,自行制造了 $300\text{t}/\text{h}$ 的绞吸船,专门用于细骨料的挖掘,针对原料含水量大进行预先脱水,取得了明显效果。

2.2 石料场技术

与天然毛料采运技术的发展相比,水电站人工料场开采和运输技术近年来取得了更迅速的发展,现阶段已呈现出百花齐放的态势,尤其体现在料场开采和运输两个技术领域的有机结合。

人工料场基本采用爆破作业,随着爆破技术和设备装备水平的提高,现阶段料场爆破常见有光面爆破、预裂爆破、微差挤压爆破及深孔爆破等,作业方式与石料运输方式紧密结合。

传统的料场开采及运输方式一般采用爆破——挖装——汽车运输的工艺进行,此方式施工环节简单,在 2000 年前一直占据主要地位,如三峡古树岭系统,月开采强度约 40万 m^3 ,采用汽车运输方式,仅 32t 的汽车就投入了约 120 台,同时道路宽度 12m ,资源和配套设施要求高。随着最近几年水电领域的技术发展和认识水平的提高,传统的料场开采与运输方式逐渐显现出资源投入大、成本高和适应性差的特点,新的料场开采和运输方式应运而生,主要表现在石料破碎和运输环节的创新上。

广西龙滩大法坪砂石加工系统料场最高开采强度约 45万 m^3 ,道路地质条件差,料场与系统高差约 300m ,传统方式难以适应开采需要,因此,石料场开采采用大型移动破碎站和移动胶带机,进行采场移动破碎,采用多级转料仓技术解决石料垂直运输难题,在国内得到成功应用,其成本与传统方式相比,总费用节省约一半。

锦屏一级水电站大奔流沟料场地形坡度 $55^\circ \sim 65^\circ$,在露天道路不可能形成的前提下,开采降段道路由约 10 公里的地下洞室群组成,石料采用长度 280m 、倾角 77° 的长斜井转运,井下大型旋回破碎设备进行破碎,半成品料长距离运输的料场开采和输送技术,为同类地形、地质条件下的料场开采提供了范例,开创了国内水电行业料场规划布置的先河。

溜槽运输方式在料场中的应用也相对广泛,如 20 世纪 60 年代的乌江渡、90 年代的二滩水电站、现阶段的锦屏水电站三滩骨料生产系统都取得了溜槽运输方式的成功经验,随着系统规模的增大,溜槽高度和输送量也逐渐增大。

3 生产系统

3.1 料源种类

用于水工混凝土的砂石骨料,无论是人工骨料还是天然骨料,涉及的原岩种类是多种多样的,目前涉及的料源有正长岩、白云岩、石灰岩、大理岩、砂岩、石英岩、花岗岩、片麻岩、玄武岩、辉绿岩等。

料源岩性能否使用主要取决于混凝土配合比试验结果,目前对料源使用限制除岩石的抗压强度外,最主要的依据在于岩石是否与水泥产生碱活性反应,如果出现碱—硅酸盐反应则必须考虑放弃或组合骨料,如向家坝水电站曾由于坝址附近的石灰岩多次试验出现碱活性反应,而导致料场放弃重新选择在30km以外的太平料场。受大坝选址的限制导致了组合骨料技术开始推广,如锦屏的砂岩粗骨料与大理岩细骨料、溪洛渡的玄武岩粗骨料与石灰岩细骨料进行组合等,通过与无碱活性反应的细骨料进行组合消除或抑制成品粗骨料的碱活性反应。

3.2 工艺流程

工艺流程是系统生产的主线,是系统规划布置和设备选择的基础。根据系统承担的产品种类、数量、强度、岩石条件、成品料质量指标、生产班制等诸多指标,确定系统的规模、工艺环节和设备选型,工艺流程最终可以决定系统的生产成本和质量指标。

根据消耗水量的大小,工艺流程可以分为干法、湿法和介于干法与湿法之间控制水量的生产工艺。三者目前并没有严格的界定,但一般来说可以按系统单位处理量用水量进行衡量。湿法工艺: $\geq 1\text{m}^3/\text{t}$; 控制水量的工艺: $0.3 \sim 1\text{m}^3/\text{t}$; 干法工艺: $\leq 0.3\text{m}^3/\text{t}$, 目前国内水电站骨料生产系统工艺基本趋于采用控制水量的工艺和干法工艺。但天然料系统大多仍采用湿法生产工艺,如三峡工程高家溪、向家坝凉水井、丹江口等目前一批系统仍然采用湿法生产工艺,主要原因在于料源本身高含水率影响筛分能力和原料中含泥量较大对成品料质量的影响。人工骨料系统选择则相对灵活,主要与料源条件相关,如广西龙滩大法坪系统由于料场夹层较多,只能采用湿法生产,系统实际耗水量 $1.2\text{m}^3/\text{t}$; 溪洛渡水电站塘房坪系统料源基本为洞挖料和大坝基坑开挖料,采用控制水量的工艺,系统实际耗水量为 $0.5\text{m}^3/\text{t}$; 锦屏水电站三滩系统采用全干法生产工艺,系统耗水量不足 $0.1\text{m}^3/\text{t}$ 。

工艺流程根据环节可以分为开路 and 闭路两种方式,全开路工艺仅在某些天然料系统和小型采石场应用,目前的骨料生产系统一般由简单的开路和闭路工艺相互组合而成,根据成品料种类、质量、系统规模、设备的破碎比和原料粒径确定破碎环节,四级配生产一般采用四段破碎,即粗碎、中碎、细碎、制砂。三级配一般采用三段破碎,受设备破碎比的影响,二级配生产也采用三段破碎。

由于不同的工程对骨料质量的要求不同,随着设备性能的提高,工艺环节上也出现了某些特殊的工艺,如整形工艺。整形工艺是一种专门针对料源加工易产生针片状的现象、结合先进的设备产生的独特工艺,这种工艺的特点是原料加工易产生针片状,如溪洛渡水

电站塘房坪系统的料源为玄武岩,系统设计时按照成品料的不同,采用了不同的设备进行整形,其中小石采用了三级整形,成品料针片状含量控制在 10% 以下,相对常规工艺降低了近 10%。在各个环节中,以制砂工艺最具复杂性,20 世纪 90 年代前的制砂工艺一般采用棒磨机,目前已经出现了冲击破碎机单独制砂和二者联合制砂的工艺。随着细骨料石粉含量比例的不断增加,辅助的石粉回收和控制工艺也发展起来,如龙滩大法坪系统采用水力分级回收,锦屏水电站三滩系统采用风力控制回收,而亭子口水电站在采用水力分级回收的同时,创新地应用了一种新的石粉生产工艺等。

3.3 系统设备

人工骨料生产系统由于系统规模、系统工艺等的不同,使用设备也各不相同,但主要设备种类一般分为:破碎设备、分级设备、输送设备、给料设备和供电等辅助设备。根据系统规模的大小和功能要求的不同,有的系统配备有石粉回收设备、水处理和供水设备、除尘设备等。按制造商则分为国产设备和进口设备。

设备选择一般根据流程计算和生产性实验数据进行,目前随着骨料生产系统的增多,各种设备使用的参数数据已较为齐整,流程计算的数据更接近实际,因此设备选择的准确性也得到提高。

设备选择必须与系统规模、布置场地条件、运行管理的方便性有机结合,一般来说,规模大的系统设备尽可能在两台以上,形成双线生产能力,有利于提高系统的可靠性,目前国内大型系统均采用此种方式。在设备来源上,根据系统的重要性和投资决定设备采用国产或进口,进口设备较早用于三峡古树岭系统中的细碎环节,由于其高性能的特点在水电站领域迅速得到推广,广西龙滩大法坪所有的破碎环节均采用进口设备。从工程投资方面考虑,尽管进口设备性能较优,但性格普遍昂贵,随着我国经济的发展和设备制造水平的提高,目前相当多的国产设备性能可与进口设备相媲美。

在其他辅助设备领域,技术水平也得到了长足发展。筛分设备由过去的小型筛逐渐过渡到大型筛、高频筛;给料设备已发展到可以实现变频控制流量,确保流程的准确性;输送设备领域在常规胶带输送机更新的基础上,出现了可连续纵、横向转弯的管带和普通胶带输送机;控制系统领域则由过去的分散控制逐渐形成 PLC 上机位集中控制的模式,大大降低了人员投入。

4 环境保护与节能减排

骨料生产系统是水电站建设中最大的环境污染源,按其危害性大小可分为生产污水、噪音和粉尘的排放,其中污水一直是困扰系统环保措施的重大难题。

骨料系统传统的污水处理工艺,是采用自然加药沉淀结合汽车清运的方式,此种方式一直持续到 21 世纪,处理后的水一般直接排放于江河中。此工艺存在着排放水污染物易超标、渣料倒运对沿途污染、构筑物易堵塞难疏通、水资源浪费的缺点,同时由于投资商在此项目的投入低,一直为骨料生产系统的短板。进入 21 世纪后,我国对污水排放浓度(SS)的指标提高,由最初的 200mg/l 逐渐过渡到 70mg/l 的达标排放,在二类水体上严禁