

2025 年度陕西省科学技术奖

《堆石混凝土坝建造技术创新与实践》项目公示信息

一、 项目名称：堆石混凝土坝建造技术创新与实践

二、 提名者及提名意见（包含提名等级）：

提名单位：陕西省水利厅

提名意见：

该成果由陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司联合清华大学等单位经过长期合作研究完成，创建了堆石混凝土浇筑密实性理论，提出了包含堆骨比、堆石粒径和级配要求的密实性保障体系，显著提高了堆石利用率；并发展了堆石混凝土力学性能指标体系，支撑了堆石混凝土坝设计和施工等系列规范的编制；研发了堆石混凝土坝工地现场性能感知成套关键技术，实现了施工期各性能的全面动态感知；研发了堆石混凝土施工管控数智化系统，实现了对东庄二道坝施工全过程的精准管控，保障了东庄二道坝施工质量达优目标。该成果主编规范 8 部，建立了完整的堆石混凝土筑坝技术标准体系；授权国家发明专利 22 项、计算机软件著作权 43 项，形成了完整的自主知识产权体系，促进了堆石混凝土筑坝技术升级；出版学术专著 2 部，发表学术论文 112 篇（其中 SCI 收录 63 篇），培养博士后及研究生共 24 名。成果推广应用于叶巴滩二道坝、永丰拱坝、平坦原抽蓄、沙千拱坝等 100 余座堆石混凝土工程建设项目，推动堆石混凝土进入了由中小工程向重大工程、由中低坝向百米高坝、由国内向国际发展的全新阶段。中国水力发电工程学会 2022 年批准成立了堆石混凝土坝专业委员会，具有广泛的行业影响力；国际大坝委员会给予了高度认可，显著提升了我国在坝工领域的国际话语权和影响力。

成果材料齐全、规范、无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术进步奖提名条件。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖一等奖。

三、 项目简介：

我国水库大坝在坝高和库容方面均位居世界前列，筑坝技术已达到国际领先水平，形成了中国经验。堆石混凝土坝由清华大学于 2003 年发明，具有工艺简单、施工快速、质量可靠、节约成本、环境友好等特点，曾获 2017 年国家技术发明二等奖。自此以后，堆石混凝土技术得到了高速发展，截至目前，堆石混凝土已累计建造大坝 217 座，完成浇筑 1005.61 万方，减少碳排放 271.52 万吨，进入了由中小工程向重大工程、由中低坝向百米高坝、由国内向海外发展的新阶段。重大工程及百米高坝给堆石混凝土浇筑密实性、真实性能指标、现场性能感知和数智化施工管控都带来了更高的要求，为满足大坝建造的高质量和高效施工要求，并实现堆石混凝土坝数智化建造和百米高坝的目标，本项目开展了堆石混凝土坝建造技术的科技攻关。

获得的主要创新成果如下：

(1) 创建了浇注密实性评价模型, 提出了大块石/骨料粒径比作为浇筑堵塞核心控制参数, 建立了堆石混凝土浇筑密实性理论, 为堆石混凝土坝设计规范在堆石粒径方面的突破奠定了理论基础。

(2) 首次提出了全尺寸堆石混凝土力学性能室内试验方法, 建立了堆石骨架孪生数字模型重构方法与堆石混凝土三相细观数值模型, 发展了堆石混凝土材料真实性能指标体系, 支撑了堆石混凝土坝设计规范升级堆石表面含泥量等指标的控制标准。

(3) 开发了堆石粒径 AI 识别系统, 研发了自密实混凝土全量检测仪和混凝土填充密实性智能检测传感器, 建立了堆石混凝土坝全方位温度监测体系, 创新了堆石混凝土坝工地现场性能感知关键技术, 实现了堆石混凝土坝施工期各性能的全面动态感知。

(4) 提出了堆石质量等级和自密实混凝土质量等级智能综合评价方法, 研发了堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R, 全面应用于东庄堆石混凝土二道坝建设, 实现了对东庄二道坝施工全过程的精准管控, 保障了东庄二道坝施工质量达优目标。

本项目授权发明专利 22 项, 发布标准 8 部, 出版专著 2 部, 获批软著 43 项, 发表论文 112 篇。成果全面应用于东庄堆石混凝土二道坝建造, 保障了该工程施工质量达优目标, 并推广应用于叶巴滩二道坝、永丰拱坝、平坦原抽蓄、沙千拱坝等堆石混凝土工程建设, 经济、社会与环境效益显著。随着“国家水网”“长江经济带发展”“黄河流域生态保护和高质量发展”“抽水蓄能发展”和“一带一路”国际水利合作等国家战略的实施, 应用前景广阔。

四、 客观评价:

1.国际大坝委员会及国际认可:

国际大坝委员会 (ICOLD) 前主席 Michael F.Rogers 评价由中国发明的堆石混凝土坝是近 20 年来中国及全世界发展最迅猛的大坝设计与施工技术之一; 国际大坝委员会现任主席 Michel Lino 认为 RFC 大坝作为新型筑坝技术, 在成本和工期方面都具有经济性, 是一种成熟、安全的大坝建造技术;

2021 年 11 月 ICOLD 正式颁布 190 号技术标准《堆石混凝土坝设计与实践》(ICOLD Bulletin 190), 这是 ICOLD 成立近百年来, 第一部以中国原创筑坝技术为主要内容的技术公报;

ICOLD 正式将堆石混凝土重力坝和拱坝列入世界大坝名录的注册坝型;

2020 年, 印度尼西亚大坝工程学会邀请金峰教授参与线上研讨会介绍堆石混凝土筑坝技术, 以推动其在印度尼西亚工程项目中的应用;

2023 年, 伊朗大坝学会邀请金峰教授参与线上研讨会介绍堆石混凝土筑坝技术。

2 成果鉴定

2022 年 6 月 14 日, 中国大坝工程学会召开《堆石混凝土筑坝关键技术与工程实践》项目科技成果评价会, 中国工程院钮新强院士、胡亚安院士等专家评价认为: 研究成果达到国际领先水平, 评分为 95.7;

2025 年 7 月 7 日, 陕西省技术转移中心召开《东庄水库堆石混凝土二道坝建造技术创新与实践》项目科技成果评价会, 中国工程院邓铭江院士等专家评价认为: 本成果整体已达到国际领先水平, 评分为 97.97。

3 学术性评价意见

美国工程院院士、中国工程院外籍院士 S.Shah 教授 2018 年发表综述论文“自密实混凝土未来研究”，指出“堆石混凝土将自密实混凝土与大粒径骨料结合，带来许多优势，减小变形、取消振捣、快速施工”，将“堆石混凝土”列入该技术领域未来三大研究方向。

五、应用情况：

项目实施期 2017 年 1 月 1 日至今，共建 171 座堆石混凝土重力坝和 11 座堆石混凝土拱坝，其中 49 座堆石混凝土重力坝和 1 座堆石混凝土拱坝在建，实际浇筑堆石混凝土超过 1327 万方。本项目成果成功应用于东庄水利枢纽二道坝工程、平坦原抽蓄下库主坝工程、永丰水库、叶巴滩水电站二道坝工程、沙千水库、新疆哈密抽水蓄能电站下水库拦沙坝工程、马跳水库拦河坝工程和石沟水库等 100 余座堆石混凝土坝工程。

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	整体技术	东庄水利枢纽二道坝工程，坝体总方量为 5.5 万立方米	2017 年至今	李萌 /15389021243
2	湖北能源集团罗田平坦原抽水蓄能有限公司	堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R	平坦原抽水蓄能电站下水库采用堆石混凝土重力坝，坝高 60.5m。	2022 年至今	程远龙 /18283653646
3	华电金沙江上游水电开发有限公司叶巴滩分公司	堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R	叶巴滩水电站二道坝选用堆石混凝土重力坝，坝轴线长 119.7m，坝顶宽 5.6m，最大坝高 45.5m，最大坝底宽 38.7m，建基面高程 2683m。	2022 年至今	赵恒 /18328320567

六、主要知识产权和标准规范等目录：

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	标准规范	Cemented Material Dam: Design and Practice	国际	ICOLD Bulletin 190	2021 年 11 月	International Commission on	清华大学	金峰

		-Rock-Filled Concrete Dam				Large Dams		
2	标准 规范	堆石混凝土 坝设计规范	中国	NB/T 10077-2 024	2024 年 9 月 24 日	中国水 利水电 出版社	中国电建集团 华东勘测设计 研究院有限公 司；清华大学	黄维；金峰；徐 建军；安雪晖； 郑鹏翔；周虎； 叶建群；吴宏 荣；涂承义；姬 广祥；王建新； 吴世勇； 张勤；彭成佳； 周相；李风亮； 王国辉；李善 平；周恒；张 冲；张全意；张 光辉；夏勇；赵 凯丽；姚胜利； 赵恒；杨俊峰； 曾旭
3	发 明 专 利	堆石混凝土 细观三相有 限元模型、建 立方法和装 置	中国	ZL2021 116562 37.1	2024 年 09 月 10 日	第 7356267 号	清华大学	金峰；梁婷；周 虎；黄杜若；江 汇；何佳龙；邱 奕翔
4	发 明 专 利	基于图像识 别技术的堆 石模拟分析 方法及系统	中国	ZL2021 107791 46.0	2022 年 06 月 01 日	第 5291139 号	清华大学	金峰，付立群， 徐小蓉，周虎， 张晨笛
5	标准 规范	水电水利工 程堆石混凝 土施工规范	中国	DL/T 5806-20 20	2020 年 10 月 23 日	中 国 电 力 出 版 社	中国水利水电 第八工程局有 限公司；浙江 省围海建设集 团股份有限公司；清华大学； 北京华石纳固 科技有限公司	涂怀健；金峰； 吴良勇；李风 亮；安雪晖；周 虎；于永军；刘 更军；杨贤水； 张勇；乔志超； 胡俊序；陈长 久；刘江川；黄 锦松；周德文； 李善平；张全 意；曾凡杜；杨 茁；殷航俊；付 显阳；俞祥丰； 徐艳杰；潘坚 文；黄杜若；万

								鹏; 罗鑫; 曾旭; 薛守宁
6	专著	Rock-Filled Concrete Dam	中国	doi.org/ 10.1007 /978-98 1-16-82 98-8	2022 年 02 月 16 日	Springer 出版社	清华大学	金峰; 黄杜若
7	论文	A Brief Review of Rock-Filled Concrete Dams and Prospects for Next-Generat ion Concrete Dam Construction Technology	中国	doi.org/ 10.1016 /j.eng.2 023.09. 020	2023 年 12 月 04 日	Engineer ing	清华大学; International Commission on Large Dams	金峰; 黄杜若; Michael Lino; 周虎
8	论文	单块石粒径 对自密实混 凝土断裂性 能的影响研 究	中国	doi.org/ 10.1324 3/j.cnki. slxb.20 230299	2023 年 10 月 25 日	水利学 报	西京学院; 西 北农林科技大 学; 清华大学	罗滔; 李玉洁; 杨毅; 潘晓凤; 金峰
9	软件著作权	堆石混凝土 坝施工管理 信息系统(电 脑版) V2.0	中国	2021SR 012214 9	2021 年 01 月 22 日	软著登 字第 6846466 号	清华大学	
10	软件著作权	东庄水利枢 纽堆石混凝 土二道坝数 字孪生感知 系统 V1.0	中国	2024SR 170716 8	2024 年 11 月 06 日	软著登 字第 1411104 1 号	陕西省东庄水 利枢纽工程建 设有限责任公 司; 清华大学	

七、 主要完成人情况:

排名	姓名	技术 职称	行政 职	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
----	----	----------	---------	------	------	---------

			务			
1	金峰	教授	系学术委员会主席	清华大学	清华大学	项目研究思路的制订者，指导研究生构建了堆石混凝土材料性能的理论体系，创新性研发了堆石混凝土坝工地现场智能化技术，形成了完整的堆石混凝土坝质量控制体系，主持编写了国际大坝委员会技术公报 190 号，参与主编堆石混凝土相关技术标准，对项目创新点 1~4 均有实质性贡献。对应附件证明材料：A1~A8、B1、B2、C1~C3、D1、D2
2	姚胜利	高级工程师	董事长	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	参与《堆石混凝土坝设计规范》的编写工作，负责堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 在东庄二道坝的应用示范，对创新点 4 有重要贡献。对应附件证明材料：A2、D2
3	罗滔	副教授	系副主任	西北农林科技大学	西北农林科技大学	提出了全尺寸堆石混凝土力学性能室内试验方法，开展了堆石混凝土大试件力学性能试验，发展了堆石混凝土材料真实性能指标体系，对创新点 2 有实质性贡献。对应附件证明材料：C3
4	徐小蓉	副教授	教研室主任	华北电力大学	华北电力大学	参与研发堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R，参与堆石混凝土坝施工技术优化与智能化研究，参与研发并撰写发明专利《基于图像识别技术的堆石模拟分析方法及系统》，对创新点 3，4 有贡献。对应附件证明材料：B2
5	周鹏	高级工程师	总经理	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	参与了堆石混凝土坝施工技术优化，推进堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 的工程应用，对创新点 4 有重要贡献。对应附件证明材料：D2
6	周虎	高级工程师	实验室主任	清华大学	清华大学	参与了堆石混凝土坝工地现场智能化技术研究及现场智能质量控制技术装备，参与编写了堆石混凝土坝系列标准，对创新点 1，3，4 有实质性贡献。对应附件证明材料：A3~A8、B1、B2、C2、D1、D2
7	黄维	正高级工程师	副主任	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司	参与了堆石混凝土浇筑密实性理论的研究工作，指导了关键参数的选取，参与主编《堆石混凝土坝设计规范》，对创新点 1 有重要贡献。对应附件证明材料：A2、A4
8	张金	正高	无	黄河勘测	黄河勘测	担任东庄水库综合设计的设总，参与二

	良	级工程师		规划设计研究院有限公司	规划设计研究院有限公司	道坝的坝型选取工作，参与推动堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 实际工程应用，对创新点 4 有实质性贡献。对应附件证明材料：Z11
9	秦民生	高级工程师	项目经理	中国水利水电第八工程局有限公司	中国水利水电第八工程局有限公司	负责编制了东庄堆石混凝土二道坝的施工方案并担任项目经理，参与推动堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 的实际工程应用，对创新点 4 有实质性贡献。对应附件证明材料：Z12
10	王健	高级工程师	副总经理	陕西省水利电力勘测设计研究院（集团）有限公司	陕西省水利电力勘测设计研究院（集团）有限公司	担任东庄堆石混凝土二道坝的设计审定人之一，负责了二道坝的坝型比选和设计方案工作，参与推动堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 的实际工程应用，对创新点 4 有实质性贡献。对应附件证明材料：Z11
11	吴迪	高级工程师	副总经理	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	参与研发现场智能质量控制技术设备，推动堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 的现场应用，对创新点 4 有贡献。对应附件证明材料：D2
12	申开为	高级工程师	部长	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	参与堆石混凝土坝施工技术优化与智能化研究，对创新点 4 有贡献。对应附件证明材料：D2
13	蒋大鹏	高级工程师	部长	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	推动堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 的工程应用，对创新点 4 有实质性贡献。对应附件证明材料：D2
14	吕鹏疆	高级工程师	部长	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	促进了堆石混凝土筑坝技术推广应用，对创新点 4 有贡献。对应附件证明材料：D2
15	张喜喜	工程师	无	四川西沐建信科技有限公司	四川西沐建信科技有限公司	作为堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 在东庄二道坝现场应用的技术负责人，参与堆石混凝土坝施工信息收集小程序和堆石混凝土数据管理终端系统的研发，对创新点 3、4 有贡献。对应附件证明材料：未列入附件

八、 主要完成单位及创新推广贡献：

排名	完成单位	创新推广贡献
1	陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司	主导了堆石混凝土技术在东庄二道坝的应用示范，参与制定了堆石混凝土坝设计规范，并参与制定了堆石混凝土坝工程智能化管控的技术路线，为堆石混凝土施工数据管理终端与堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 的优化升级工作提供了重要支撑，对创新点 3、4 均有实质性贡献。
2	清华大学	主编了堆石混凝土相关系列技术标准，采用室内试验、现场试验、原型观测，并利用数值模拟、AI 智能识别等多种研究手段，建立了堆石混凝土密实性理论，发明基于真实堆石骨架的三相细观有限元建模方法，创新堆石混凝土坝工地现场性能感知关键技术，研发堆石混凝土坝施工数智化系统 CIM4R，实现了堆石混凝土坝高效、优质施工，推动堆石混凝土坝应用从中低坝到高坝。对创新点 1~4 有实质性贡献。
3	西北农林科技大学	建立了全尺寸堆石混凝土力学性能室内试验方法，开展了堆石混凝土大尺寸试件力学性能室内试验，发展了堆石混凝土材料真实性能指标体系，对创新点 2 有实质性贡献。
4	华北电力大学	参与发明专利、计算机软件著作权的技术研发与撰写工作，参与研发了集成多元传感器的堆石混凝土施工数据管理终端，参与了堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 的开发与优化工作，对创新点 3、4 有实质性贡献。
5	中国水利水电第八工程局有限公司	参与堆石混凝土施工工艺研究与标准编制，负责了东庄堆石混凝土二道坝的施工，对创新点 2 有实质性贡献。
6	陕西省水利电力勘测设计研究院（集团）有限公司	参与了堆石混凝土浇筑密实性研究，作为设计单位协助建设单位完成了技术成果的应用转化，负责成果的总结及技术成果的推广应用，对创新点 1 有实质性贡献。
7	黄河勘测规划设计研究院有限公司	作为设计单位协助建设单位完成技术成果的应用转化，负责成果的总结及技术成果的推广应用，对创新点 4 有实质性贡献。
8	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司	参与堆石混凝土坝设计方法研究与标准编制，指导了堆石混凝土密实度关键参数的选取，对创新点 1 有重要贡献。
9	四川西沐建信科技有限公司	共同研发集成多元传感器的堆石混凝土施工数据管理终端，并协同完成堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 的研发生产、现场应用与迭代优化，对创新点 3、4 均有实质性贡献。

10	湖北能源集团罗田平坦原抽水蓄能有限公司	作为成果产业化实施单位，主导平坦原抽水蓄能电站项目的落地与开展，并支持了堆石混凝土施工管控数智化系统 CIM4R 的优化升级。对创新点 4 有重要贡献。
----	---------------------	--

九、完成人合作关系说明：

本项目在成果实施阶段，由第一完成人金峰教授全面主持，负责项目总体技术路线的规划与核心方案的制定，为项目的顺利实施提供了顶层设计与技术指导；姚胜利、罗滔与徐小蓉作为项目的核心成员，承担了关键技术的研发攻关及项目落地实施建设任务，确保了技术方案在实际工程中的有效转化与应用；周鹏、周虎、黄维、张金良、秦民生、党力、申开为、蒋大鹏、吴迪、吕鹏疆与张喜喜作为项目参与成员，深度参与了项目总体技术架构与实验设计方案的论证与优化，并围绕各创新点及关键技术开展了系统性的研究与开发工作，为项目的技术突破与成果产出提供了重要支撑。

- 1.金峰/1、罗滔/3 合作完成并发表了论文“单块石粒径对自密实混凝土断裂性能的影响研究”。
- 2.金峰/1、徐小蓉/4、周虎/6 合作发明并授权了专利“基于图像识别技术的堆石模拟分析方法及系统”。
- 3.金峰/1、徐小蓉/4、张喜喜/15 合作完成并发表了论文“基于 SAM & ImageJ 图像处理的堆石混凝土坝层面露石率研究”。
- 4.金峰/1、姚胜利/2、周虎/6、黄维/7 合作制定了标准规范《堆石混凝土坝设计规范》。
- 5.金峰/1、姚胜利/2、周鹏/5、周虎/6、申开为/11、蒋大鹏/12、吴迪/13、吕鹏疆/14 合作完成并登记了软著“东庄水利枢纽堆石混凝土二道坝数字孪生感知系统 V1.0”。
- 6.张金良/8、王健/10、吕鹏疆/14 合作编制了陕西省泾河东庄水利枢纽工程初步设计报告。
- 7.秦民生/9、吴迪/11 合作编制了陕西省东庄水利枢纽二道坝混凝土专项施工方案。

合作者排名完成人和完成单位按照实际贡献大小依次排名，各完成人和完成单位一致同意其排名。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	金峰/1，罗滔/3	2019	2023	单块石粒径对自密实混凝土断裂性能的影响研究	C3
2	共同知识产权	金峰/1，徐小蓉/4，周虎/6	2017	2023	基于图像识别技术的堆石模拟分析方法及系统	B2
3	论文合著	金峰/1，徐小蓉/4，张喜喜/15	2017	2024	基于 SAM & ImageJ 图像处理的堆石混凝土坝层面	未列入附件

					露石率研究	
4	共同参与 制定标准 规范	金峰/1, 姚胜利/2, 周虎/6, 黄维/7	2018	2024	《堆石混凝土坝设 计规范》	A2
5	共同知识 产权	金峰/1, 姚胜利/2, 周鹏/5, 周虎/6, 吴 迪/11, 申开为/12, 蒋大鹏/13, 吕鹏疆 /14	2020	2024	东庄水利枢纽堆石 混凝土二道坝数字 孪生感知系统 V1.0	D2
6	产业合作	张金良/8, 王健/10, 吕鹏疆/14	2020	2024	陕西省泾河东庄水 利枢纽工程初步设 计报告	Z11
7	产业合作	秦民生/9, 吴迪/11	2020	2024	陕西省东庄水利枢 纽二道坝混凝土专 项施工方案	Z12