

1. 水工隧洞开挖影响带补强加固 复合灌浆材料

该技术成果基于省部计划项目，已获得发明专利：改性沥青乳液与改性水泥的复合灌浆材料及其制备方法（ZL 201410573093.7）。

◆ 技术原理

根据水工隧洞开挖影响带岩体的渗漏水特点，以快速堵漏补强材料设计为基础，针对性研发出快速堵漏补强的沥青-水泥复合灌浆材料、丙烯酸盐灌浆材料和防渗堵漏补强的环氧树脂灌浆材料。结合三种材料性能，综合运用沥青-水泥封堵较大渗漏水，丙烯酸盐用于细微裂隙渗漏封堵，高强度环氧树脂进行结构补强加固的特点。材料的联用，形成多维空间无裂隙弹性堵漏防水体系，建立了“沥青水泥+丙烯酸盐+环氧树脂”联用快速堵漏耦合工艺，实现了多功能复合灌浆材料耦合效应，对开挖影响带岩体渗漏水进行有效处理，形成一套完整的全工况快速堵漏补强灌浆整体技术方案。

◆ 技术特点

- （1）浆液具有较好的渗透性；
- （2）浆液具有水下不分散、不冲散性能；
- （3）固结体与岩体裂隙之间应具有足够的粘结强度，不会在水压或灌浆压力下发生脱粘、挤出破坏等失效现象；
- （4）固结体具有较高的物理力学性能，能承载压力的变化带来的破坏；

（5）固结体具有较好的化学稳定性，长期水下环境服役过程中不发生化学破坏。

◆ 技术指标

（1）针对水工隧洞开挖影响带岩体存在有压水和动水，漏水速度快且流量大等技术难题，研发出快速堵漏漏青-水泥复合灌浆材料。该材料变形可达 1.5%、高强度（60MPa 以上）、高流动性、初凝时间可调（2~15min）等性能。

（2）针对岩体难以有效浸润、固结的难题，研发出防渗补强环氧灌浆材料。该材料具有高强度（80MPa 以上）、高浸润渗透性（初始粘度 6mPa s，与岩体接触角为 0°）、胶凝时间可调（2~106h）、水下固结性能好（湿粘接 $\geq 4\text{MPa}$ ）和环保无毒（LD50 $> 5000\text{mg/kg}$ ）等性能。

◆ 应用范围及前景

适用于隧洞开挖影响带扰动岩体加固补强和堵漏、大埋深超长隧洞和重大地质灾害应急处置等水利水电工程地质病害处理。

该项技术初始运用于西部高坝大库水电站局部地质缺陷处理，取得了一定的效果，后经不断摸索与试验，包括材料性能的耦合与匹配、现场施工工序的调整及施工设备的更新与改进，最终该项技术成功运用于溪洛渡（溪洛渡拱坝河床 14#坝段复合灌浆和 AGR1、AGR2 灌浆平洞滴水洞段浅层化学灌浆处理）、清蓄（清远抽水蓄能电站尾支和中平洞围岩灌浆处理）及广蓄电厂 B 厂引水隧洞

防侵蚀防贝处理上，取得了较好的使用效果。

技术名称： 水工隧洞开挖影响带补强加固复合灌浆材料

持有单位： 长江水利委员会长江科学院

武汉长江科创科技发展有限公司

联系人：喻志强

电话：027-82829732、18674006088

2.水轮机表面稀土改性纳米复合抗磨蚀 涂层关键技术

该技术成果基于省部计划项目,已获得 3 项发明专利:

一种超高音速火焰喷枪（ZL 201610466204.3）; 一种含 Re 的抗高温碳化钨基金属陶瓷复合粉末、涂层及其制备工艺（ZL 201610169159.5）; 一种稀土掺杂纳米复合陶瓷涂层及其制备工艺（ZL 201410186130.9）。

◆ 技术原理

针对水轮机在服役过程中遭受的磨蚀问题,研究分析磨蚀的内在机制:泥沙冲蚀、汽蚀、磨损、腐蚀、疲劳等复杂的交互作用,在超高音速热喷涂技术、材料微结构设计以及制备稀土改性纳米配方等的研发基础上,解决关键技术难题,形成一种水轮机表面稀土改性纳米复合抗磨蚀涂层关键技术,最终有效解决水轮机表面的磨蚀问题,大幅提高了水轮机的表面性能及使用寿命。

◆ 技术特点

（1）喷枪结构创新设计。通过结构创新设计,大幅提高了喷枪的焰流速度,达到 11 马赫。显著提升了热喷涂过程中粒子速度、聚集度等,从而提高涂层与基体的结合力、降低涂层孔隙率（0.5%以下,显微镜 400 倍放大测试）。解决了普通超音速喷涂的焰流速度低（一般为 6-7 马赫）、孔隙率高（一般在 1%-2%左右）等关键技术问题。

（2）稀土改性纳米抗磨蚀功能粉末配方及超高音速火焰热喷涂喂料开发。基于材料的微结构设计,运用纳米

粉末技术、稀土改性技术及复合材料技术，获得新型的稀土改性纳米粉末配方，并进一步研究使得粉末配方、颗粒度、流动性等适合超高音速火焰喷枪，成为新型的、稳定的喷涂喂料。

（3）通过涂层的设计及工艺优化，不断完善粉末配方以及超高音速火焰喷涂技术的匹配度，开发出最终的水轮机表面抗磨蚀涂层。可以解决普通热喷涂涂层与基体结合力较低，强韧性差，在高浓度、高速、高压泥沙冲击下，表面涂层易剥落等问题。

◆ 技术指标

抗磨蚀涂层结合强度 $\geq 125\text{MPa}$ ，显微硬度 $> 1350\text{HV}0.2$ ，孔隙率 $< 0.5\%$ ，抗磨损性能是基体（ZG000Cr15Ni5Mo）的 120 倍以上，耐磨蚀性能是基体（ZG00Cr13Ni5Mo）的 20 倍以上。

◆ 应用范围及前景

该技术可应用于水利水电行业的水轮机、水泵等水力机械，同时可用于航空航天、交通运输冶金、石油化工等领域。

案例 1：在水利水电大型工程上，该成果已应用到新疆卡拉贝利、小浪底、万家寨-龙口、缅甸瑞丽江一级水电站等水利枢纽和大型水电站，以及红寺堡、东雷引黄泵站等水利设施，取得良好的抗磨蚀效果。

案例 2：该成果成功应用于杭州恒力泵业制造有限公司、常州东申泵业股份有限公司、安徽莱恩电泵有限公司等 10 余个企业的产品上，成功进行了产业化，大大提高了产品的竞争力。累计新增销售额近 20 多亿元。获得了显著的经济、社会和环境效益。利用本项目技术成果，可延长设备使用寿命，大幅度实现节能减排，生态效益明显。



■小浪底水电站水轮机导叶磨蚀严重经行修复并抗磨蚀涂层防护



■黄河龙口水电站水轮机桨叶修复



■新疆卡拉贝利水利枢纽工程水轮机转轮抗磨蚀防护处理

技术名称：水轮机表面稀土改性纳米复合抗磨蚀涂层关键技术

持有单位：水利部产品质量标准研究所（水利部杭州机械设计公司）

联系人：陈小明

电话：0571-88087115、15967150165

3. 纳米（纳硅）混凝土及钢结构防护涂层

该技术核心成果已获得“一种混凝土表面防碳化纳米涂料及其制作工艺”等 5 项国家授权发明专利。

◆ 技术原理

“纳硅”涂料基于“荷叶效应”仿生原理设计，采用溶胶凝胶技术制备纳米二氧化硅粒子，通过硅氧烷偶联剂进行纳米粒子改性，运用纳米自组装技术实现纳米粒子的可控生长，制备成具有空间三维网状结构的纳米材料，该材料粒径小、比表面积大、表面能高，可在常温下固化成高固含的钝性结晶膜。

◆ 技术特点

该结晶膜呈独特的微纳二元粗糙表面结构，拥有界面效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应，兼具二氧化硅的物理、化学稳定性及纳米结构的量子光学特性。“纳硅”涂层具有高附着力、高疏水、高硬度、高耐磨、高耐化学品、高耐候等优异的物理、化学性能。

◆ 技术指标

- （1）细度 $\leq 0.1 \mu\text{m}$ ；硬度 $\geq 6\text{H}$ ；
- （2）耐人工加速老化性 $\geq 10000\text{h}$ ，漆膜无起泡、剥落、粉化；
- （3）耐碱性（饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ） $\geq 5000\text{h}$ ，漆膜无异常；
- （4）耐酸性（ H_2SO_4 浓度 5%）3 个月，漆膜无异常；
- （5）耐盐水性（饱和盐水） $\geq 5000\text{h}$ ，漆膜无异常；

(6) 耐盐雾性 $\geq 2000\text{h}$ ，漆膜不起泡、不脱落；

(7) 附着力（拉拔法） $\geq 8\text{MPa}$ ；

(8) 耐化学品性（10%NaOH，10%H₂SO₄）3 个月，漆膜无异常；

(9) 抗氯离子渗透 $2.1 \times 10^{-6} \text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 。

◆ 应用范围及前景

适用于大坝、水闸、泵站、堤防、港口、码头、桥梁、隧道、核电、房建、市政等各类混凝土和钢结构构筑物。

纳米（纳硅）混凝土及钢结构防护涂层在国内许多地区的水利、市政等 150 个基础设施养护中得到推广应用，累计销售 95 吨。

典型工程：已在丹江口水利枢纽水位标尺涂装项目（南水北调中线控制工程）、都江堰人民渠钢闸门防腐项目（全国最大灌区）、福建向金门供水工程跨海管桥防腐项目（国家重大水利工程）、观景口水利枢纽工程水位标尺涂装项目（国家 172 重大水利工程）、龙滩水电站警示标语纳硅涂装项目（大唐电力重点水电项目）、王甫洲水利枢纽纳硅水位标尺警示标语涂装项目、沙垞水电站厂房-防浪墙-水位井等纳硅防腐涂装项目、马崖水电站大坝钢护拦防浪墙水位标尺纳硅涂装项目、水洛河固滴水电站水位标尺涂装项目、湖南岳阳污水处理厂纳硅涂装项目、山东某闸门厂闸门及混凝土导轨纳硅防腐涂装项目、合肥市政桥梁病害维修工程、重庆市政彭家花园隧道群纳硅涂装

项目、广西桂林市政蜈蚣山犁头山隧道纳硅防腐涂装项目、重庆市黔江区光明隧道正阳隧道迎宾大道隧道群、舟白复线隧道纳硅防腐涂装等项目中应用。



■ 闸门的混凝土导轨纳硅防腐涂装



■ 福建金门供水项目混凝土桥墩重防腐



■ 湖北丹江口项目

技术名称： 纳米（纳硅）混凝土及钢结构防护涂层

持有单位： 重庆卡勒斯通科技有限公司

长江水利委员会长江科学院

联系人： 张学明

电话： 023-88597728、13901193557

4.输水建筑物混凝土表面防淡水壳菜附着 及功能性环氧涂层防护技术

该技术核心成果基于省部计划项目,已获得 1 项发明专利:一种输水隧洞混凝土表面防护及防贝涂层(ZL 2017 10245711.9); 1 项实用新型专利:一种抽水蓄能电站输水隧洞混凝土的修补防护结构(ZL 201720398086.7)。

◆ 技术原理

该技术在研究环氧材料低温开裂机理的基础上,采用新型的环氧配合体系,通过添加纳米混合填料和氟硅等低表面能助剂,降低涂层表面糙率系数,研制出一种输水隧洞混凝土表面防护及防贝类涂层。该产品可有效减少或防止淡水壳菜等贝类生物附着,具有优异的抗冲磨、防渗、防碳化、抗冻融、抗背水压等性能,提高混凝土输水效率和耐久性,延长检修周期,提高运行效益。

◆ 技术特点

SK-YEC 输水建筑物防壳菜附着及功能性环氧涂层防护技术具有以下特点:(1)壳菜混凝土附着密度比: < 0.09 ,防壳菜附着效果好;(2)表面糙率系数:0.010,降糙效果明显;(3)良好的基础物理性能:拉伸强度 $\geq 15\text{MPa}$;断裂伸长率 $\geq 5\%$;混凝土粘结强度 $\geq 4.0\text{MPa}$ (或基材破坏);(4)裂缝扩展温度: $< -30^{\circ}\text{C}$,裂纹阻断能力优异;(5)出色的施工性能:适用于潮湿基面、高湿环境,一次施涂厚度 1.5mm 以上。

◆ 技术指标

表面糙率系数 0.010，拉伸强度 $\geq 15\text{MPa}$ ；断裂伸长率 $\geq 5\%$ ；混凝土粘结强度（干燥基面 $\geq 3.0\text{MPa}$ （或基材破坏），潮湿基面 $\geq 2.5\text{MPa}$ ）。

◆ 应用范围及前景

适用于输水建筑物混凝土表面防生物附着、降糙、抗冲磨、防渗、防碳化等修补加固技术。

已成功应用于广州广蓄 A、B 厂引水系统隧洞防侵蚀防贝处理工程（2015 年、2018 年）、山西禹门口暗涵改造工程（2016 年）、南水北调东干渠、南干渠修补防护工程（2017 年）、松山河口电站调压井及引水隧洞防渗处理（2011 年）等，总使用面积达 20 余万平方米，应用效果优异，取得了很好的经济、社会效益。

技术名称：输水建筑物混凝土表面防淡水壳菜附着及功能性环氧涂层防护技术

持有单位：中国水利水电科学研究院

北京中水科海利工程技术有限公司

联系人：赵波

电话：010-68781465、13911174613

5.大型水利设备过流部件循环修复再制造 及表面防磨减阻节能处理技术

该技术已获得 6 项实用新型专利：一种高频爆震熔射装置；一种耐磨水轮机叶轮；一种新型水轮机叶轮；一种渣浆泵泵腔结构；一种杂质泵叶轮；一种耐磨弯头。

◆ 技术原理

该技术针对水轮机及离心泵的汽蚀磨损这一业内通病难题，结合军转民技术，首次在国内用高频爆震熔射技术将专有的非晶金属陶瓷粉末熔射在零件表面形成高韧性、抗冲击超硬涂层，在非晶陶瓷涂层上进一步选择性涂覆专有抗汽蚀、磨蚀的聚合物陶瓷涂层，形成双涂层防护。该技术开发了配套专用涂层施工工艺，可在用户现场实现灵活快速涂层施工，双涂层既可抵抗泥沙冲刷磨损，又能很好解决强汽蚀对水轮机和泵的过流部件破坏，使水轮机部件的金属磨耗失重量降低为原来的 $1/40$ ，成功解决了水利过流部件的汽蚀磨损问题。

◆ 技术特点

（1）联合开发的高频爆震熔射非晶-陶瓷超硬涂层复合聚合物陶瓷抗磨蚀双保险涂层技术首次在国内真正解决了水轮机、离心泵等关键过流部件在强汽蚀工况下的磨蚀损坏难题，该防护涂层技术可以应对绝大部分水机、灌排泵恶劣工况下的强汽蚀磨损问题，应用该技术既可以修复报废的水机、灌排泵部件，让部件起死回生穿盔戴甲，又能对新机部件表面进行表面熔射薄膜涂层预防护。

（2）水轮机或水泵用了该防护技术，运行一个大修期过流面基体金属磨耗量降低为原来的 1/40，由于金属磨损程度大大减轻，叶片机械尺寸长期不发生变化，机组的动平衡稳定性均有非常明显地改善。又由于涂层的光滑远超金属，具有明显的减阻节能效应。

◆ 技术指标

（1）非晶陶瓷涂层硬度 HRC70~80，非晶陶瓷涂层厚度 0.3mm，非晶陶瓷涂层结合强度 $\geq 70\text{MPa}$ 。

（2）聚合物陶瓷涂层厚度 2~3mm，聚合物涂层结合强度 $\geq 40\text{MPa}$ ，聚合物最高工作温度 170°C 。

◆ 应用范围及前景

适用于水电站、提灌抽水泵站、挖泥泵、污水泵过流部件的修复及抗磨蚀涂层防护场合。

水机部件修复及耐磨涂层防护技术研发成功后，从 2015 年开始陆续在国内一些有代表性的水电站及泵站进行推广，目前已服务 50 余套机组累计 230 余件过流部件，进行了汽蚀磨损涂层治理，该技术用模块化移动工作站在用户现场对水轮机的转轮、静导叶、活动导叶、尾水管等部位进行现场涂层施工，由于防护涂层抗气蚀性能强、施工便捷、施工周期快，其抗汽蚀抗磨损效果卓越。

代表性的水电及泵站：国网新源白山电厂 6 号机 7 号机导叶强汽蚀修复及涂层防护、万家寨水电站 2 号 5 号水轮机过流部件修复及涂层防护、引黄工程南一干线泵站 6 号泵过流部件修复及涂层防护、引黄工程总干二级泵

站 10 号泵过流部件修复及防护、国网长甸发电厂 1 号机转轮涂层防护、兰州景泰泵站七套管排泵修复及涂层防护、新疆台兰河水电站水轮机过流部件涂层防护、丹东长丰水电站 1 号机组导叶修复与防护等。



■引黄工程南一干线泵站 6 号泵部件修复



■国网新源白山电站 6 号机导叶汽蚀部位修复



■ 万家寨水电站 2 号机组水轮机转轮抗磨防腐涂层修复

技术名称：大型水利设备过流部件循环修复再制造及表面防磨
减阻节能处理技术

持有单位：天津阿麦特工程技术有限公司

爱德艾瑞（北京）科技发展有限公司

联系人：魏伟

电话：022-26316478、13693259458