

中国科学院力学研究所

科技成果汇编



2018年5月

力学所简介

中国科学院力学研究所（以下简称力学所）创建于 1956 年，是以钱学森先生工程科学思想建所的综合性国家级力学研究基地，在国际力学界享有盛誉，为我国“两弹一星”、载人航天事业及国家经济社会发展做出了重要贡献。钱学森、钱伟长为第一任正、副所长；郭永怀副所长曾长期主持工作；继任所长为郑哲敏、薛明伦、洪友士、樊菁，现任所长秦伟。

力学所明确并坚持自身发展定位，即坚持工程科学思想，聚焦制约国家重大任务的关键共性技术和核心科学问题，推动力学与相关学科的深度交叉，实现原始创新、系统集成、平台建设和人才培养的有机结合，建设国际一流科教融合工程科学研究中心。

力学所主要研究方向为：微尺度力学与跨尺度关联，高温气体动力学与跨大气层飞行，微重力科学与应用，海洋工程、环境、能源与交通中的重大力学问题，先进制造工艺力学，生物力学与生物工程等。

力学所现设有 5 个实体实验室。非线性力学国家重点实验室（LNM）、高温气体动力学国家重点实验室（LHD）、中国科学院微重力重点实验室（国家微重力实验室）（NML）、中国科学院流固耦合系统力学重点实验室（LMFS）以及先进制造工艺力学重点实验室（MAM）。

建所以来，力学所承担并完成了一批重要的国家科研任务，并取得有影响的科技成果，先后获国家、中国科学院和各部委各种科技奖 230 余项，其中国家最高科学技术奖 1 项、特等奖 3 项、一等

奖 4 项、二等奖 13 项、三等奖 10 项，中国科学院和部委级一等奖 24 项。一些重要的应用成果受到中央领导的充分肯定。

力学所科研队伍实力雄厚，共有在职职工 450 余人，其中科技人员 380 余人。包括中国科学院院士 8 人，中国工程院院士 1 人，研究员 70 余人，副研究员、高级工程师和高级实验师 150 余人，国家杰出青年科学基金获得者 8 人，国家“千人计划”青年项目入选者 1 人，中国科学院“百人计划”入选者 17 人，国家优秀青年科学基金获得者 2 人。

力学所是我国最早招收研究生、首批具有博士学位授予权和建立博士后科研流动站的单位之一，也是中国科学院博士生重点培养基地之一。现有博士生导师 50 余人，硕士生导师 100 余人。在读博士研究生 100 余人，在读硕士 200 余人。从 1956 年开始招收研究生至今，力学所共有毕业生 1330 余人，为国家培养了大批优秀的科研人才和管理人才。

建所以来，力学所已同 41 个国家和地区的科研机构开展了广泛的学术交流和科技合作。通过有效开展对外交流与合作，充分吸纳和利用海外资源、培养锻炼年轻人、引进高端人才和提升自主创新能力，促进了相关研究工作的深入开展，提升了力学所的国际学术地位。设立在力学所的“北京国际力学中心”依托中国力学学会建立，2010 年 9 月被国际理论与应用力学联合会 (International Union of Theoretical and Applied Mechanics, 简称 IUTAM) 正式批准成为其关联所属组织，是该组织设在亚太地区唯一的国际性力学中心。

前 言

力学所围绕科学院“三个面向”“四个率先”新时期办院方针，以推动相关区域和行业创新体系建设，提升产业技术创新能力为目标，不断加强空天、海洋、环境、能源与交通等重要领域的科学创新和高新技术集成，并不懈推进产业化进程。

力学所科技成果转化以工程科学思想为指导，积极培育高端技术，共建合作平台，逐步形成跨学科、跨领域、跨区域的战略联盟。在实际工作中践行并丰富“出成果、出人才、强基础、增收入”的理念，促进科技成果尽快转化为现实生产力，为支撑我国战略新兴产业的发展发挥重要作用。

为了宣传和推广我所取得的科技成果，促进我所的科技成果转化，我们整理编写了《中国科学院力学研究所科技成果汇编》。汇编重点收集了我所近年的主要科技成果，内容涵盖航空航天、交通能源、生命健康、先进制造和力学专用软件等领域。其中很多科技成果实用性强、技术较成熟、具有较好的推广应用前景。

热忱欢迎社会各界与我所加强产学研合作，早日将科技成果转化成生产力，以更好地为我国的经济建设服务。

由于时间紧，有些成果没能及时编入，更多的科技成果信息可前往我所网站院地合作模块查看。编写中存在的不足之处，敬请各单位给予批评指正。

联系地址：力学所科技处

联系电话：010-82543888

邮箱：yangyunxiao@imech.ac.cn

目 录

航空航天类.....	6
JF-12 复现高超声速飞行条件激波风洞	6
新型液体火箭发动机技术.....	8
低温液氧泵.....	10
生命健康类.....	13
无标记光学蛋白质芯片技术.....	13
生物人工肝的关键技术.....	18
低成本高纯度纳豆激酶的生产技术.....	22
基于数字骨力学的精准医疗技术.....	25
便携式大气压空气冷等离子体发生器.....	26
交通能源.....	28
高速列车系列技术.....	28
管道式分离技术及设备.....	33
绿色高效节能的矿石粉化技术.....	39
转炉烟气全干法余热回收技术.....	42
超临界 CO ₂ 发电循环技术.....	46
燃气诊断系统.....	49
先进制造.....	53
先进水下吸声阻尼材料——声子玻璃复合材料.....	53
高能脉冲磁控溅射 (HiPIMS) 技术及工程应用.....	58
混动汽车全铝发动机缸体内壁陶瓷化技术.....	64
YAG 激光毛化技术及装备	68
发动机缸体内壁激光刻蚀技术.....	73
高质量碳化硅晶体材料生长及加工技术.....	80
气动雾化法生产微细球形铝合金粉末生产工艺技术及设备.....	82
复合速凝水泥注浆及配套工艺.....	88
铜基合金激光高密度改性技术及应用.....	92
激光先进制造装备系统.....	97
专用软件.....	98
利科岩土工程分析软件.....	98
地质灾害监测预警系统.....	103

航空航天类

JF-12 复现高超声速飞行条件激波风洞



1. 技术介绍

JF-12 复现风洞可以复现高度 25–50km、速度 Ma5–9 的飞行条件，风洞总长 265m，喷管出口直径 2.5m，试验段直径 3.5m，实验时间超过 100ms，比同类风洞提高 1 个量级，是国际最大、整体性能最先进的激波风洞，先后获得美国航空航天学会地面试验奖、国家技术发明二等奖、中科院杰出科技成就奖等。



2. 应用领域

主要应用于航空航天高超声速飞行器气动力/热特性、关键部件分离、高马赫数冲压发动机、飞行器/发动机一体化、边界转捩实验等。

3. 技术成熟度及应用案例

成功应用于国家重大专项和多项航天任务，在飞行器气动力 / 热特性、关键部件分离、高马赫数发动机、飞行器带动力一体化等重大和特种试验方面发挥了不可替代的作用。（具体案例视整体情况确定）

4. 技术团队简介

团队负责人姜宗林研究员，俞鸿儒院士担任技术指导。技术团队共有职工 20 余人，研究生近 20 人。



5. 知识产权情况

JF-12 复现风洞团队提出了系统的爆轰驱动激波风洞理论，发明了体系完整的复现风洞实验技术，研制成功国际首座复现高超声速飞行条件的超大型激波风洞，整体性能国际领先，成就了我国大型气动实验装备由仿制迈向创新自主研制的先例。

新型液体火箭发动机技术

1. 技术介绍及特点

新型液氧/煤油火箭发动机采用燃烧、传热与结构耦合设计平台设计，集成了高温合金 3D 打印技术、C-SiC 复合材料喷管技术、新型同轴射流喷嘴技术等多种先进技术。

3D 打印技术的发展，给发动机冷却系统与结构的设计带来了革命性的变化。冷却通道形状与布置方式的设计不再受制于传统工艺的束缚，发动机结构也可以通过计算机辅助设计得到最大程度的优化。团队充分利用 3D 打印带来的便利，针对性地发展了一种发动机燃烧、传热与结构耦合设计方法，完成了发动机冷却系统与结构的优化设计，研制成功高温合金 3D 打印液氧煤油发动机原理样机（图 1a），并完成了一系列长时间地面考核试验（图 1b）。



图 1 (a) 3D 打印火箭发动机 (b) 地面点火及燃烧试验

基于 CFD 辅助设计提出了一种基于“龙卷风”自引射原理的双组元旋流喷嘴（图 2），在射流出口中心形成一个负压区，把两种流体吸入并充分混合，从而实现高效混合与稳定燃烧。

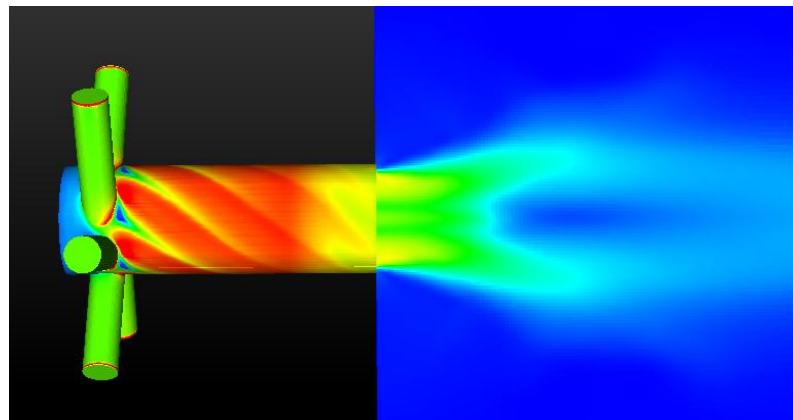


图 2 基于自引射原理的双组元旋流喷嘴速度场数值模拟结果

与上海硅酸盐所合作开发了 C/SiC 陶瓷基复合材料发动机尾喷管（图 3a），并顺利通过 100 s 点火与热防护试验考核（图 3b）。



图 3 (a) C/SiC 复合材料尾喷管 (b) 热防护考核试验

2. 应用领域

航空、航天推进领域

3. 技术团队简介

中科院力学所发动机研发团队是我国最早开展超燃冲压发动机研究的团队之一。二十多年来，在国家自然科学基金委、总装 863、中科院知识创新工程、国家重点实验室以及国家重大专项等支持下，深入开展了碳氢燃料超声速燃烧与发动机主动冷却技术等研究，在加热/裂解燃料的流动、传热、燃烧及燃烧稳定性等方面取得了一系列

列原创性成果。近年来，在科学院“战略性先导科技专项”等项目的支持下，开展了小型液氧煤油火箭发动机的研究工作。

团队目前已有核心研发人员 10 人，9 名博士，其中正高级研究员 2 人，副高级研究员 7 人，平均年龄不到 40 岁，涵盖流体力学，工程热物理，燃烧学，物理化学，光学，机械工程等多个专业领域。

低温液氧泵



1. 技术介绍及特点

随着航天事业的发展，液氢、液氧等低温推进剂在运载火箭上获得了进一步的推广应用。为了实现低温推进剂的输送与增压，以满足航天发动机的高效稳定运行，低比转速 ($30 < n_s < 80$) 离心泵现已成为航天领域研究的热点。现代运载火箭的研发不断地向着更高推力的目标发展，必然要求氧化剂泵体积更小、转速更快、扬程更高。但是液氧等沸点极低的液体，在离心泵大流量、高转速、高

扬程的运行工况下，容易出现汽蚀、密封失效、叶轮失速、流致振动等问题，严重制约泵的性能及可靠性。因此，高效低比转速液氧离心泵的研发，对于改善氧化剂泵工作条件及性能，进而提升液体火箭推力、工作稳定性、可靠性和安全性，具有十分重要的意义。

2. 应用领域

低比转速液氧泵应用广泛，主要应用于用于液氧的输送与增压，是化工、航空、航天等重要领域的关键设备。

3. 技术成熟度及应用案例

目前研发出来的低温液氧泵样机用于中国科学院先导 B 项目中，为 1 kg/s 液氧煤油发动机提供液氧供给，图 1 和图 2 分别为样机总装图以及离心泵整体结构方案。

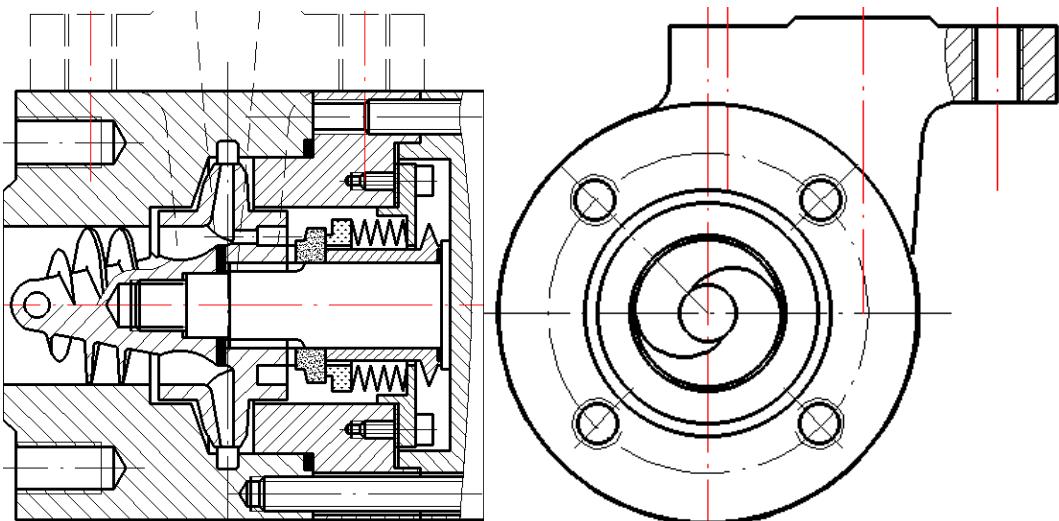


图 1 低温液氧泵的总装图

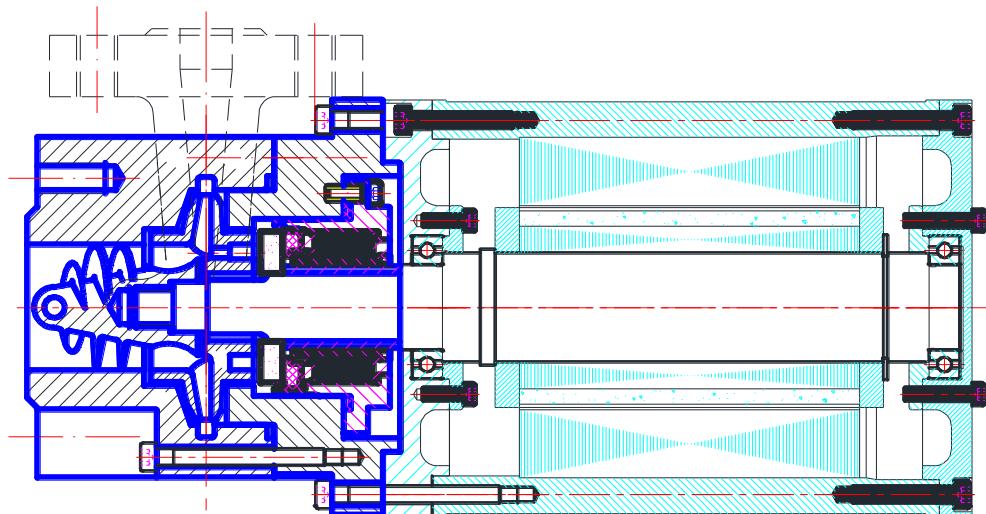


图 2 离心泵整体结构方案

4. 技术团队简介

中国科学院力学研究所洁净燃烧科研团队立足于航天、冶金与电力领域，主要在燃料洁净燃烧及余热高效利用等方面开展研究开发与工程示范，先后多次承接了国家计划及中国科学院的重点项目等科研项目，在冶金和电力企业取得了显著的应用成绩。团队曾获得国家技术发明二等奖及中科院科技进步一、二等奖 6 项，获国家发明专利 20 余项。目前该团队形成了一支 20 余人的研发团队和工程队伍，其中研究员 1 人，副研究员 4 人，博士 5 人，在研发方面具有雄厚的基础和力量。科研团队始终面向国家重大需求，秉承工程科学思想，积极与企业深入合作，努力为国家的空天节能环保工作做出更要贡献。

生命健康类

无标记光学蛋白质芯片技术

1. 技术介绍及特点

无标记光学蛋白质芯片技术是由中国科学院力学研究所研发，将可同时检测多种蛋白质分子的微阵列、蛋白质分子间特异性识别和高分辨椭偏光学成像技术相结合而发展成的具有无标记、高灵敏度、高通量特点的新型蛋白质分子相互作用定量检测技术，具有独立自主知识产权。

与现有临床体外诊断方法相比，无标记光学蛋白质芯片技术在检测时间、样品消耗、检测成本和操作等方面均具有显著优势，能够在面对种类繁多、性质各异的蛋白质分子间相互作用分析时，同时满足高通量和高灵敏度检测的要求，其具体技术指标如下：

- 检测时间：1-120 分钟可调；
- 样品流量：1-1000 微升；
- 检测结果读取时间：小于 10 秒钟；
- 检测灵敏度：优于 0.1ng/ml （标准试剂盒）。

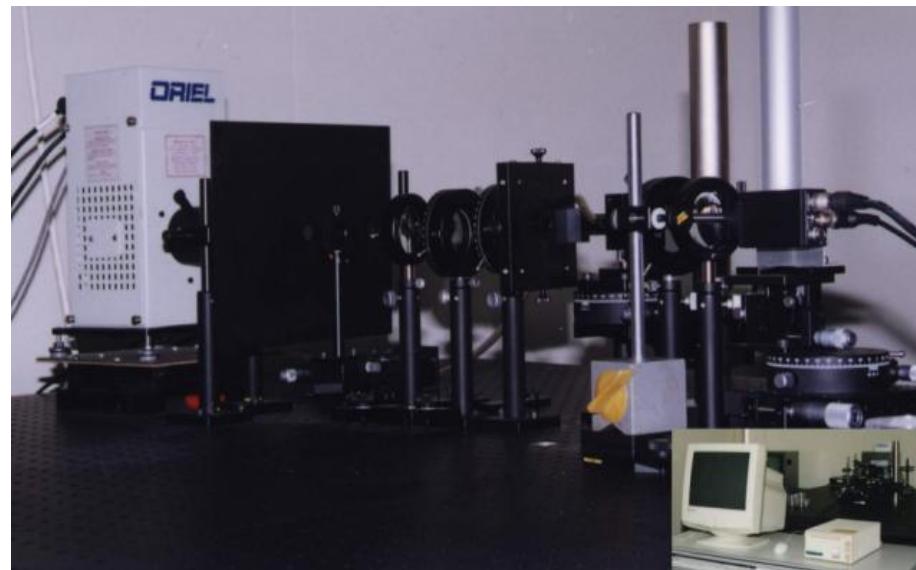
2. 应用领域

抗体筛选、药物亲合力测定、疾病标志物（谱）临床检测、食品过敏原鉴定、病毒检测、环境指标监测等。

3. 技术成熟度及应用案例

中国科学院力学研究所靳刚研究员于 1995 年提出了无标记光学蛋白质芯片技术方法学概念，经过 15 年的实验室原理验证、单元技

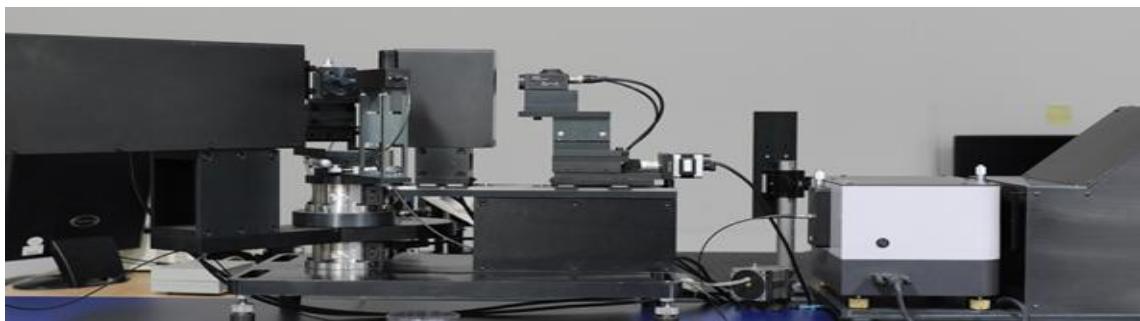
术攻关和三代实验室样机的发展，技术业已成熟，在生物医学和临床医学领域已经取得众多成功的应用经验，如抗体筛选、药物亲合力测定、疾病标志物（谱）临床检测、食品过敏原鉴定和病毒检测等，近年在环境污染物监测方面亦有建树。



第一代实验室样机



第二代实验室样机



第三代实验室样机

在成功研发出三代实验室样机的基础上，2011 年起，中国科学院力学研究所与贵州省最大的医疗器械生产企业贵州金玖生物技术有限公司针对无标记光学蛋白质芯片技术及其配套试剂展开了产业化开发，双方的合作基础牢固可靠，连续签订了排他性合作框架协议，成立了合资公司贵州中科金玖生物技术有限公司，并在贵阳双龙科技园投资超过 5000 万元建设预研实验室厂房，组建产品产业化科研团队，并储备了大量专业技术工人。



中科金玖生物技术有限公司基础设施及产业化样机

在该技术研发期间，获得了归口于国家科技部、自然科学基金委员会和中国科学院的多项重大重点研究项目的支持，累计研究经费投入超过 4000 万元。基于该技术的研究成果，已发表高水平文章超过 200 篇，在国际学术会议上做大会邀请报告超过 50 次，形成了囊括技术所有关键环节的专利池，并构建了国家标准。该技术于 2006 年通过中国科学院技术鉴定，主要技术指标达到国际先进水平，并于 2010 年在国家 863 目标导向项目中取得“该技术方法明显优于传统使用的肿瘤标志物检测方法，学术成果产出效果明显，产业化前景广阔”的验收结论。该技术还获得了 2007 年北京市科学技术奖和 2014 年全国侨联创新成果贡献奖。

4. 技术团队简介

技术团队由靳刚研究员、牛宇副研究员、冯冉冉副研究员和于桂清主管组成。

靳刚研究员于 1993 年获法国巴黎皮埃尔·玛丽·居里大学和 ESPCI 物理学博士，先后出任法国国家科研中心合作研究员、瑞典林雪平大学客座科学家、葡萄牙里斯本大学客座教授和韩国亚洲纳米生物科技研究所国际研究员。1996 年至今任中科院力学所研究员、博士生导师、所学术委员会委员。兼任过中国科学院专家委员会委员、山东省医学科学院客座教授、中国科学院知识创新“十五”重大项目首席科学家、中国医学科学院微循环研究所特聘研究员、生物芯片实验室主任、学术委员会副主任委员、中国生物物理学会生物物理技术分会理事和中国科学院基础研究发展战略重点规划专家。靳刚研究员主要从事光学纳米检测和生物分子测试技术研究、二维纳米生物材料及生物分子间相互作用研究和蛋白质芯片技术等研究。目前，靳刚研究员已发表科技报告 200 多篇，在国际会议上做邀请报告 50 余次，申请专利 30 余项。

牛宇副研究员、冯冉冉副研究员和于桂清主管分别负责生物医学、表面化学和科研管理方面的工作。

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	氯硅烷聚乙二醇衍生物及其合成方法和用途	ZL02121353. 4	王战会、靳刚
2	共价固定生物分子的蛋白质芯片及其制备方法	ZL02120716. X	王战会、靳刚
3	用于生物分子芯片微量加样和反应的方法及其装置	ZL03102659. 1	王战会、靳刚
4	一种在蛋白质芯片表面固定蛋白质的方法	ZL03157199. 9	王战会、靳刚
5	一种生物芯片的制作方法	ZL03157324. X	王战会、靳刚

6	一种改性蛋白芯片表面的方法	ZL03157200.6	王战会、靳刚
7	入射角度扫描椭偏成像测量方法和装置	ZL2004100382619	靳刚、孟永宏
8	采用旋转补偿器积分采样的椭偏成像方法和装置	ZL2008101022712	靳刚、孟永宏
9	一种双脂膜表面改性的蛋白质芯片及其制备方法和用途	ZL2006100651065	靳刚、王战会、梁伟、刘妍
10	一种光电复合检测溶氧的方法及实验装置	ZL201310145354.0	李萌、刘巍、靳刚

生物人工肝的关键技术

1. 技术介绍及特点

肝细胞体外培养系统，简称生物人工肝，是指人工培养的肝细胞作为基本单元的体外生物反应系统。肝细胞体外培养系统与人体血液循环通路连接，为急性肝衰竭等肝病患者提供体外肝脏功能支持。基于此，我们发展了以下两种相关的关键技术：

1) 体外三维肝血窦模型：

鉴于成熟肝细胞不能体外增殖，离体肝细胞功能体外维持时间的长短是限制生物型人工肝应用的关键因素，而肝血窦作为肝脏的主要微循环网络，是肝细胞在体生存的主要场所，具有复杂的结构组成及力学、物理微环境。体外三维肝血窦模型是以模拟肝细胞的生理微环境为目标，深化肝血窦微组织结构-功能关系，优化肝细胞体外生长环境。

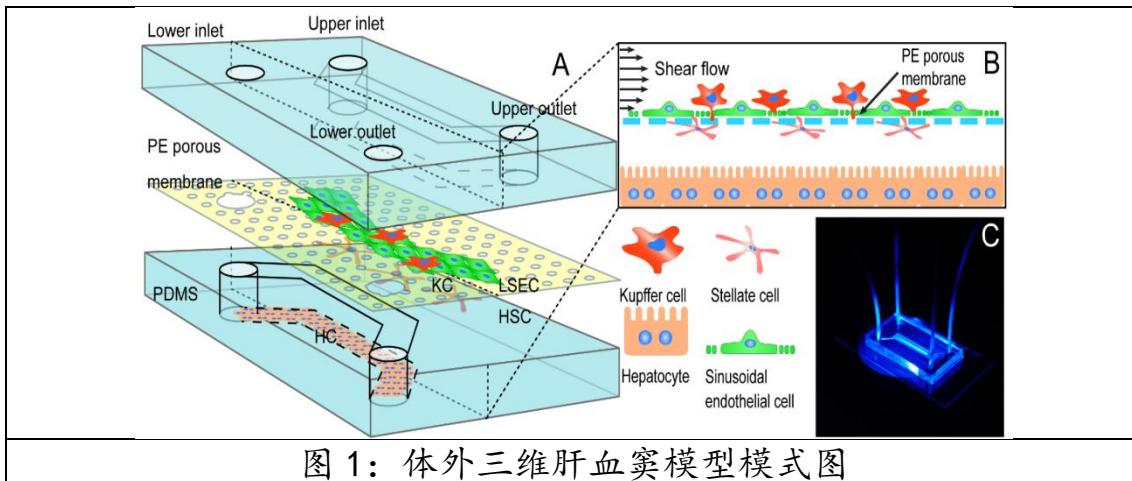


图 1：体外三维肝血窦模型模式图

我们研发了四种肝系细胞（肝实质细胞、肝血窦内皮细胞、库否氏细胞及肝星形细胞），两层流道（血窦内腔、窦间隙）共存的体外三维肝血窦模型（图 1）。基于该模型，进一步研究发现流动剪切及非实质细胞的共培养均可提高肝细胞的功能；共培养时两种重要的生长因子 VEGF 和 HGF 的分泌可能是维持和促进肝细胞功能实现的主要原因。此外，流动剪切和非实质细胞共培养可以增强肝血窦体外模型中肝细胞在细胞色素酶 CYP1A2 和 CYP2D6 作用下药物非那西丁和右美沙芬的代谢，在高通量药物筛选方面具有潜在的应用前景。与在体动物实验相比，该模型的条件更加可控且成本较低，具有较高的应用前景。相关工作已作为封面文章在 *Lab Chip* 发表，高通量的阵列式筛选平台目前正在进一步优化中。

2) 正交流动、三明治肝细胞生物反应器原理样机

目前生物人工肝构建与应用的另一个主要问题是：肝生物反应器器的流动动力学环境设计不够优化，细胞培养的密度与规模化不理想、肝细胞与血浆的物质交换性能不高，不能为肝细胞提供理想的微环境，氧合作用不佳、肝细胞代谢产物无法排除、营养液的物质输运不理想、无免疫阻隔、操作难等。

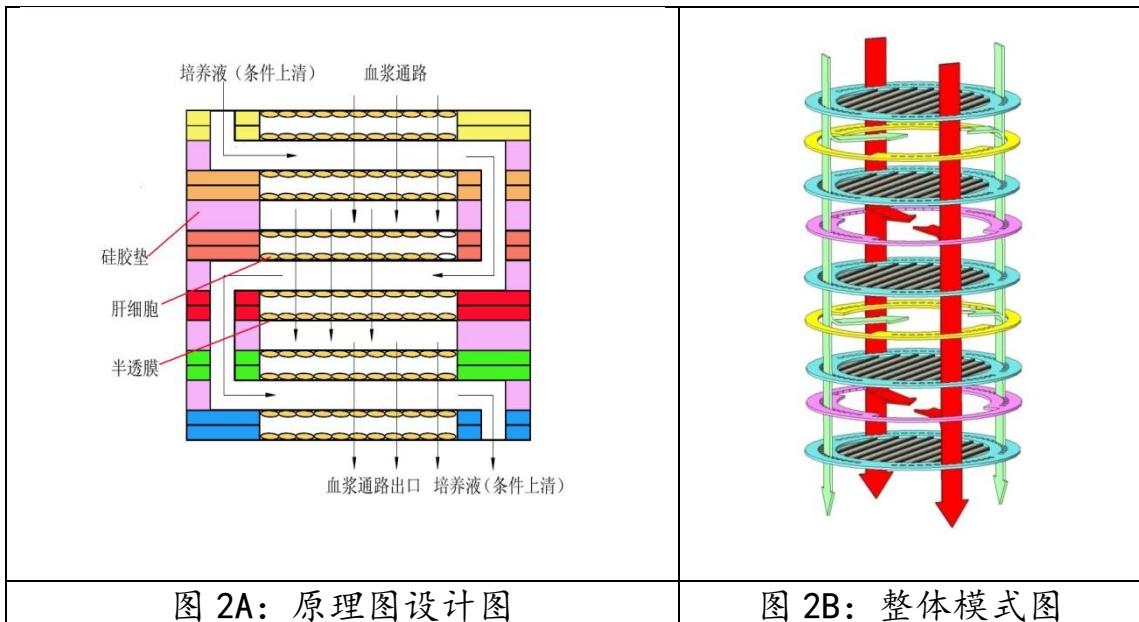


图 2A：原理图设计图

图 2B：整体模式图

采用理论分析、数值模拟并结合生物学验证的策略，我们自主研发了正交流动、三明治肝细胞生物反应器原理性样机，其包括培养桶、上盖、下盖及若干个培养单元；上盖和下盖的结构相同，均包括培养液进口、培养液出口；每个培养单元从下至上包括培养液导流片、肝细胞培养片，肝细胞培养片包括圆片框和半透膜，半透膜粘接在圆片框上，在圆片框的圆周上分布多个第一通液孔；培养液导流片是外径等于圆片框外径的圆环形状，在其圆周的两个相对侧上分别具有一个向内径向突起的凸片，在两个凸片的至少一个的圆周处设有多个与第一通液孔对应的第二通液孔；在最上端的培养单元上放置一个培养液导流片。该反应器的半透膜粘接在圆片框上，肝细胞培养液进入半透膜，肝细胞培养片之间通过培养液导流片密封，并且血液与肝细胞培养液有各自的通道，在每个培养单元交替灌液，实现双流路，因此细胞培养的密度与规模化理想、肝细胞与血浆的物质交换性能高，能够为肝细胞提供理想的微环境，氧合作用好、肝细胞代谢产物可以排除、营养液的物质输运理想、具有免

疫阻隔、操作简单。目前已经完成原理样机制备和物理验证，正在进行进一步优化中。

2. 应用领域

- 1) 体外三维肝血窦模型：应用于肝脏纤维化/硬化和肿瘤转移的免疫调控机制；相关肝脏疾病的药物筛选；
- 2) 正交流动、三明治肝细胞生物反应器：生物人工肝临床应用。

3. 技术成熟度及应用案例

目前均已完成原理样机制备及物理验证。

4. 技术团队简介

本团队主要负责人为龙勉研究员是国家杰出青年基金获得者、中科院百人计划入选者、973 项目首席科学家、美国医学与生物工程院会士 (AIMBE Fellow)、国际医学与生物工程院会士 (IAMBE Fellow, IAMBE)。先后兼任工程化构建与力学生物学北京市重点实验室主任、中科院力学所生物力学与生物中心主任，世界生物力学理事会 (WCB) 执委、国际生物流变学会 (ISB) 理事、中国力学学会副理事长、全国生物力学专业委员会主任委员、全国生物力学暨生物流变学专业委员会主任委员等。近五年来，聚焦于肝内免疫应答的生物力学机制研究，自主研发了体外三维肝血窦芯片与正交流动、三明治肝细胞生物反应器，揭示了肝血窦内白细胞募集的力学-生物学耦合机制。在 *Nature*, *Nature Plants*, *Lab on a Chip*, *Biomaterials* 等杂志发表论文137 篇，授权发明专利11 项。团队成员包括研究员1人（吕守芹）、副高级5人、中级1人，具备力学物理与生物学/医学交叉的知识背景和光机电控一体化的技术基础，具有从事技术和工程的专业人员，形成一支科学与技术相结合、协同攻关的交叉团队。

低成本高纯度纳豆激酶的生产技术

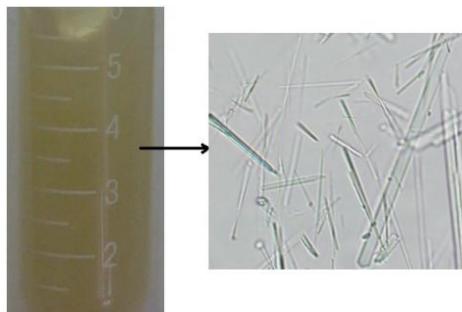
1. 技术介绍及特点

1) 技术介绍：以由黄豆或鹰嘴豆等发酵得到的粗品纳豆激酶作为原料，通过批量结晶纯化的方法获得高纯度纳豆激酶。

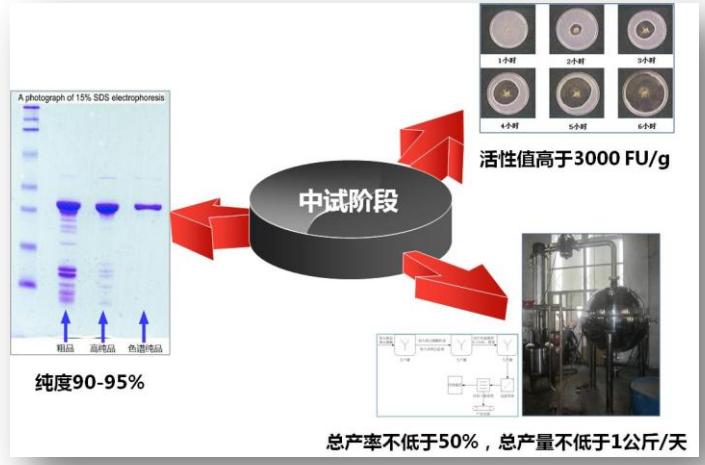
2) 技术特点

(1) 工艺简单：在粗品纳豆激酶溶液中通过加入多种环境友好的试剂，在室温条件下经搅拌、静置生长一段时间（2-5 天）后，粗品纳豆激酶中的杂质留在溶液中，溶液中的固体为纳豆激酶晶体。简单固/液分离后即可得到高纯度纳豆激酶。高纯度纳豆激酶生产工艺适宜于工业化生产。

(2) 产品纯度高：纳豆激酶晶体纯度不低于 80%。



实验室制备的 10ml 级纳豆激酶晶体溶液（左图）和纳豆激酶晶体照片（右图）



(3) 产品成本低：

公司	单价（元/g）
大和公司（日本）	84
和光纯药公司（日本）	130
燕京啤酒（中国）	124
我们制备的高纯纳豆激酶	40

备注：表中其他公司的产品非高纯纳豆激酶。

2. 应用领域及前景分析

应用领域：特膳食品、功能性食品、保健品等。

前景分析：国内预制食品产业达到 1 万亿。特膳食品属于功能性预制食品，目前正处于市场的起步阶段，纳豆激酶特膳食品在预制食品应用市场上是个空白，因此将有巨大的市场空间。

纳豆激酶与目前其他溶栓药物的比较

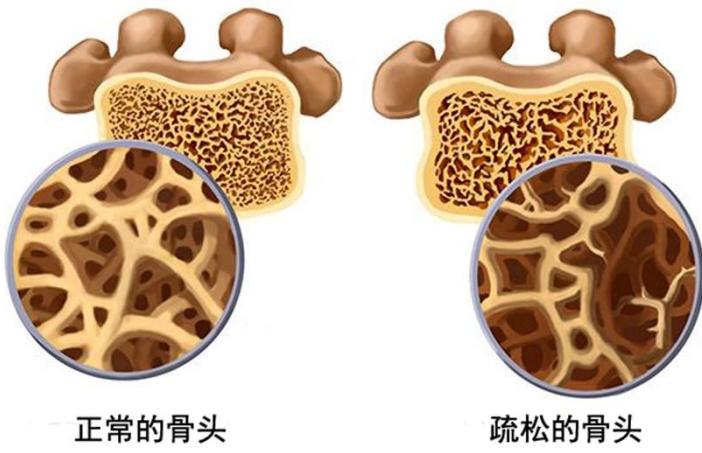
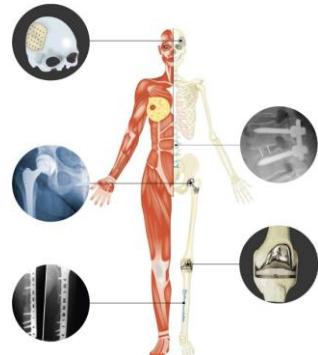
项目/产品	尿激酶	链激酶	组织型纤溶酶原激活剂	纳豆激酶
价格(元/天)	500-1000	1000-1700	1000-2000	15-30
体内作用时间	15分钟	15-30分钟	15-30分钟	12小时
出血性副作用	有	有	有	无
使用方法	静脉注射	静脉注射	静脉注射	口服

3. 知识产权情况

结晶纯化工艺目前作为商业秘密，未申请专利。检索国内外文献，未能检索到相关的纯化工艺报道，也未能检索到高纯纳豆激酶的工业化生产的报道。

基于数字骨力学的精准医疗技术

中国人口老龄化问题日趋加重，预计 2025 年中国 60 岁以上老人将达到 3 亿。老年人的健康成为政府和民众极为关注的问题。其中老年人骨质疏松极易发生骨折，影响其运动机能，进而诱发并发症威胁生命健康。因此对骨折的事前风险预测以及事后精准医疗成为医学界迫在眉睫的问题。

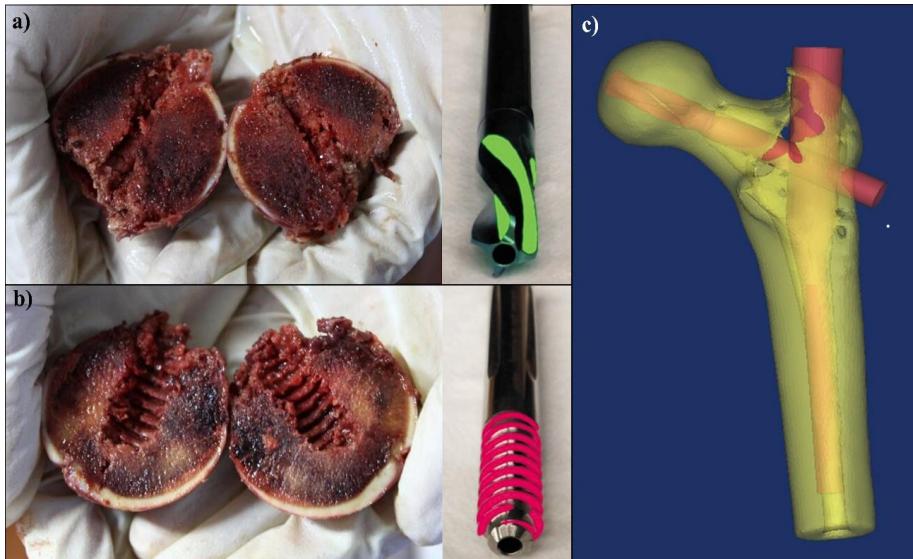


这其中涉及的关键科学问题是通过对骨的力学性能的精确判断。

然而目前骨科临床医学上常用的 CT、X 片等诊疗依据，无法提供力学

信息。因此对于骨质疏松的患者，医生只能凭经验处理，导致手术风险加大、预后不良病例增多。

本项目提出了一种基于数字骨力学的精准医疗技术，通过 QCT 推演骨的力学性能，对骨质疏松患者的手术方案进行个性化精准设计，也可



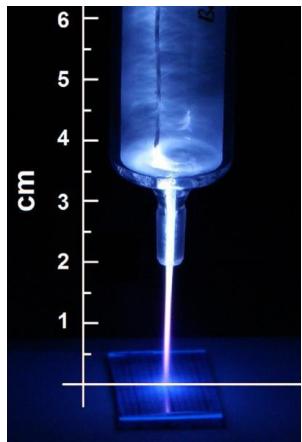
用于健康体检中对骨折风险的预测。目前已将该技术应用于股骨近端骨折手术方案的设计。

便携式大气压空气冷等离子体发生器



1. 技术介绍及特点

等离子体是物质除固态、液态和气态之外的第四态，按照温度的不同，可以分为高温等离子体和低温等离子体，低温等离子体又分为热等离子体和冷等离子体；按照粒子温度分布的不同可以分为热平衡等离子体和非热平衡等离子体。大气压冷等离子体以其温度低、无需复杂昂贵真空系统以及活性物质丰富等特征，近年来广泛应用于皮肤治疗、口腔医学、食品工程、材料改性、纳米合成和环境工程等领域，其主要活性物质包括活性氧和活性氮基团、激发态和亚稳态粒子、电场、带电粒子、紫外线及热量等。近些年来，人们根据应用需求的不同，广泛设计了丰富多样的大气压冷等离子体射流发生器。这些射流发生器主要以昂贵的稀有气体作为激发气源，同时等离子体工作离不开体积庞大的气源和电源设备。如何借助自然界条件，充分发挥空气优势，实现大气压空气冷等离子体射流的应用值得我们探讨。我们设计了一款便携式空气冷等离子体发生器，摆脱传统大体积的电源和气源设备，既可以在空气中激发，也可以在水下激发。该便携式空气等离子体射流发生器设计使得大气压冷等离子体从实验室迈向市场走近人类生活成为可能。



Br. J. Dermatol., 2010, 163:78 J. Endod., 2009, 35(4): 587 Appl. Surf. Sci., 2014, 314: 367

2. 应用领域

杀菌消毒: 伤口愈合、口腔治疗、医用工具消毒、家居卫生、水果保鲜

环境保护: 空气净化、污水净化

材料制备: 纳米材料合成

3. 技术成熟度及应用案例

原理样机一台

4. 技术团队简介

中国科学院力学研究所应用等离子体力学课题组隶属于高温气体动力学国家重点实验室。课题组已有近五十年历史。多年来积累了直流等离子体射流产生技术、高频热等离子体射流、大气压非平衡等离子体、交流等离子体射流产生技术，以及多弧离子镀、中频对靶磁控溅射、射频感应等离子体镀膜等技术。在等离子体状态控制和参数诊断方面有长期的工作经验和知识积累。在等离子体材料工艺应用方面开展了大量的低气压/大气压等离子体喷涂、金属表面改性、熔敷、熔凝、镀膜等研究。近年来课题组的主要研究方向集中在等离子体流动稳定性、先进空间电推进、空天高焓流动地面模拟、大气压空气冷等离子体发生器设计等领域。

交通能源

高速列车系列技术

1. 技术介绍及特点

在国家科技支撑计划重大项目“中国高速列车关键技术研究及装备研制”，的资助下，中国科学院力学研究所高速列车团队形成了较完备的高速列车空气动力学设计技术。建立了优化设计方法和动模型实验平台，形成了我国高速列车空气动力学研究体系。其主要特点有：

- 1) 基于压缩空气加速、磁涡流非接触制动、实验快速恢复等发明技术，研制了世界上规模最大、实验速度最高的双向运行高速列车动模型实验平台。同时，研制了具有弹性隔振支撑、加减速段限位和实验段自动切换的车载六分量测力天平，填补了动模型气动力测量的技术空白。利用该平台，已为我国多种高速列车研制提供了气动实验支撑数据。
- 2) 发展了多目标优化设计方法，构建了高速列车气动优化设计平台。以气动阻力、尾车升力和远场气动噪声为设计目标，通过优化，得到了性能更优的标准动车组气动方案。大西线线路考核试验表明，中国标准动车组具有更加优良的气动性能。
- 3) 本项目发展的高速列车气动优化设计技术，已用于我国 CRH380 系列、中国标准动车组、更高速度等级高速列车、城际列车等研制，为中国高速铁路发展做出了突出贡献。参与“京沪高速铁路工程”项目获 2015 年国家科学技术进步特等奖。主持“高速列车空气动力学优化设计及评估技术”项目分别获 2016 年中国力

学科技进步一等奖和 2014 年第五届中国侨界创新成果贡献奖。

参与“设计时速 380 公里高速动车组技术研发及应用”项目获 2012 年铁道科技进步特等奖。

2. 应用领域

- 1) 高速列车的气动特性评估
- 2) 高速列车动模型试验
- 3) 高速列车外形优化设计

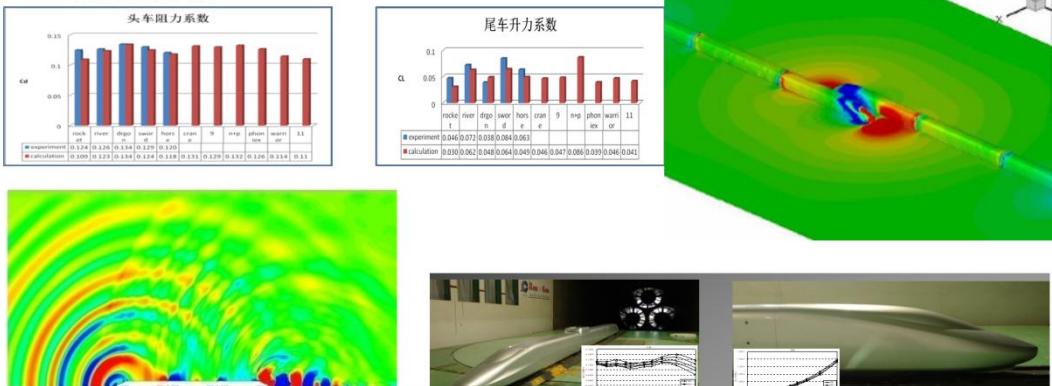
3. 技术成熟度及应用案例

1) CRH380 系列高速列车气动定型设计

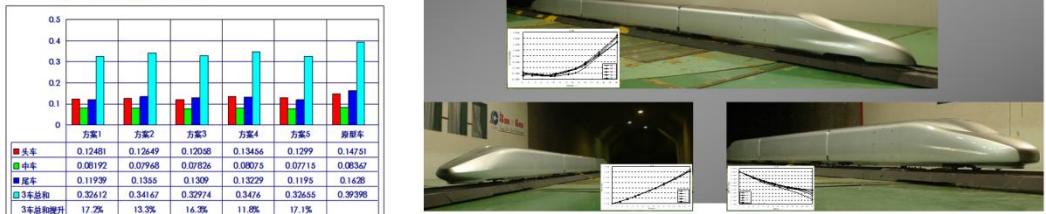
针对新一代 CRH380A 高速列车研制，完成了多种头型方案无横风和不同强度横风运行场景下的气动性能和气动噪声评估；完成了单车隧道通过、明线及隧道会车场景的压力波分析。通过综合性能比较，筛选出 5 种性能优良的高速列车头型方案，进行风洞实验，最终确定了 CRH380A 的头型方案。

针对 CRH380B 研制，在分析原型车 CRH3 的气动阻力源的基础上，完成了风挡、空调整流罩、裙板、受电弓整流罩等结构部件的多方案气动性能比较，确定了改进方案并通过了风洞实验验证，线路试验验证了改进方案的有效性，CRH380B 型高速列车总阻力相对于原型车 CRH3，总阻力减小 8% 左右。

➤ 数值分析



➤ 风洞实验



➤ 减阻方案验证

实验条件：三辆编组，缩比1:8, 60m/s, 侧滑角-30~+30度



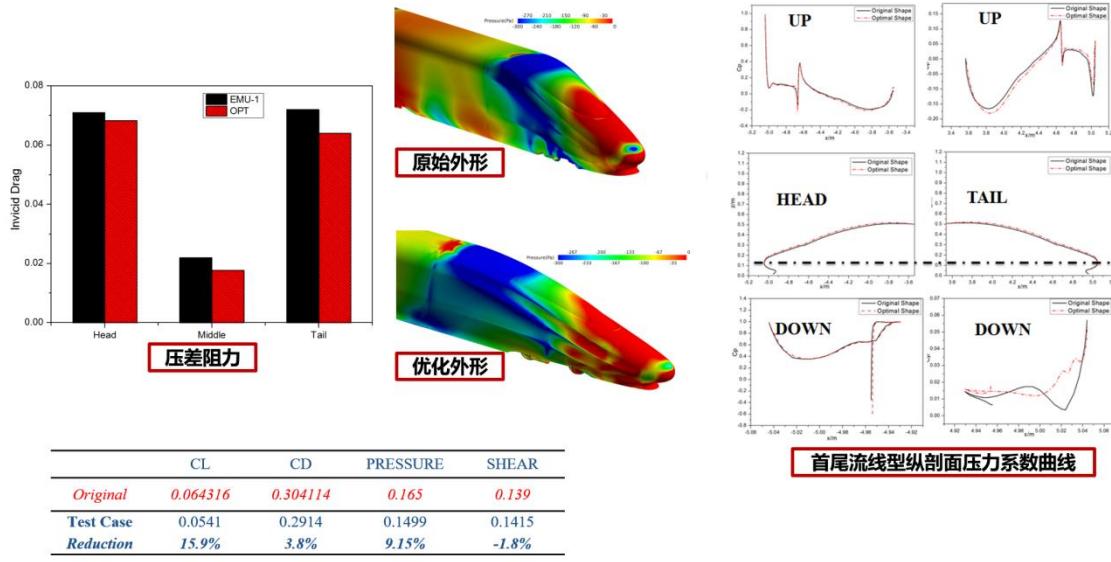
Model	减阻策略	阻力
1	半封闭风挡	-4.1%
2	全封闭风挡	-4.2%
3	流线型空调整流罩	-1.4%
4	流线型受电弓导流罩、无空调机组	-4.6%
5	中间车转向架裙板下沿80mm	-0.9%
6	5+头车转向架裙板下延至转向架轴心高度，下延伸同时向外圆滑过渡	-1.7%
7	转向架延伸至与设备仓平齐	-5.7%
8	1+3+6	-8.9%

➤ 局部减阻方案

- ✓ 外风挡采用半包形式
- ✓ 空调整流罩采用流线型
- ✓ 头车转向架裙板下延至转向架轴心高度，同时向外圆滑过渡
- ✓ 其它转向架裙板下沿80mm

2) 标准动车组优化设计

针对筛选的标准动车组方案，以气动阻力、尾车升力和远场气动噪声为设计目标，通过优化，得到了性能更优的标准动车组气动方案（授权高速列车头型设计发明专利 1 项）。相对于 CRH380A，三辆编组气动阻力系数降低约 11%，尾车升力系数降低约 19%，远场气动噪声降低约 2dB(A)。



3) 高速列车气动性能动模型试验

主要通过动模型平台测试高速列车的压力、气动力、列车风、压力波等参数。应用案例包括：

- (1) 超高速动车组动模型试验；
- (2) 时速 250 公里标准动车组动模型试验；
- (3) 双层动车组动模型试验；
- (4) 时速 350 公里标准动车组动模型试验；
- (5) 时速 400 公里高速列车动模型试验；

4. 技术团队简介

2008 年，科技部与原铁道部签订了两部联合行动计划即《中国高速列车自主创新行动计划》，启动了国家支撑计划重大项目“高速列车关键技术研究及装备研制”，目标是研制最高运行时速 380 公里的新一代高速列车。在此背景下，初步形成了目前的高速列车空气动力学科研团队。

团队核心成员主要围绕高速列车气动性能和气动噪声评估、气

动优化设计、动模型气动实验技术、列车结构静/动强度评估和设计、气动对车辆运行安全性和舒适性影响等开展研究。涉及空气动力学、结构动力学、车辆动力学、噪声工程、实验技术等多学科系统耦合问题。

该团队参与了我国已研制和在研的所有高速列车气动性能评估和气动定型设计，具有较强的团队精神、科研攻关能力，对我国高速列车设计技术提升和高铁产业的发展起到了不可替代的作用。

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	一种高速列车模型实验平台	ZL201210435081.9	杨乾锁 杨国伟
2	基于动量传递的防回弹高速列车模型加速装置	ZL 201210170188.X	杨乾锁
3	基于压缩气体驱动的高速列车模型加速装置	ZL201110398808.6	杨乾锁 杨国伟
4	一种用于高速列车动模型实验平台的减速装置	ZL201220577232.X	杨乾锁 杨国伟

管道式分离技术及设备

管道式分离技术是通过 T 型管、柱形旋流管、轴向旋流管的多种组合，以适应不同流量、不同含率、不同油品、不同工况、不同处理要求的各种实际使用情况。

管道式分离技术的主要优点就是体积小、重量轻、占地面积少，分离效率高，工艺流程简单、操作简便，已成为系统的适用于陆地、海洋平台及深海海底、采油井井底等各种使用环境和条件油田采液处理新技术。



1. 技术介绍及特点

- 管道式多相分离技术是利用重力、离心、膨胀等复合原理，形成以 T 型管、旋流管、S 型管、气浮旋流等为核心的分离技术设备，通过不同的工艺组合，在这些管道中可以动态完成油、气、水、砂的单项或多相分离任务，可用替代传统的

- 分离工艺和设备，在石油工业，已研制出配套的地面、水下、井下分离设备和工艺；
- 分离装置具有体积小，重量轻，投资少，组合灵活，效率高的优点，在安全性能上远远高于压力容器式的分离装置，并可以与原有工艺流程兼容对接。在石油领域应用于新油站建设、老联合站、转油站的扩容、节能减排、污水处理、天然气除湿等，还可降低边远井的拉油成本和拉油安全分险、可部分代替原油接转脱水站和联合站的三相分离器、解决就地注水井的水源问题、延长下游管线系统寿命、降低压力容器的安全风险等，可为用户量身定制解决方案。

2. 应用领域

- 可用于石油、化工、煤炭、造纸，制药等行业中的多相分离；
- 在新建工程中，可以提供完成的处理方案，减少征地面积和大型罐建造数量，极大节省投资费用；在老站扩容改造工程中，可以快速灵活接入原有流程，有效提高原有处理能力，改善出水水质，并可降低药剂使用和加热费用。从用户需求出发，切实给用户带来建造安装成本和运行成本的节省，技术成熟可靠，因此具有广泛的市场应用前景。

3. 技术成熟度及应用案例

应用案例 1：将旋流管（直径 50mm、10 个）+T 型管（直径 630mm）+复合脱水罐（200m³）的组合工艺用于油田的高粘特稠油（粘度：10Pas～50Pas、密度：950 kg/m³）的油水两相分离生产线。在不加温、不掺稀油条件下，实现 8000m³/d 油水混合液量的分离。对含水 90%的油水混合液，脱出 70%以上水，污水

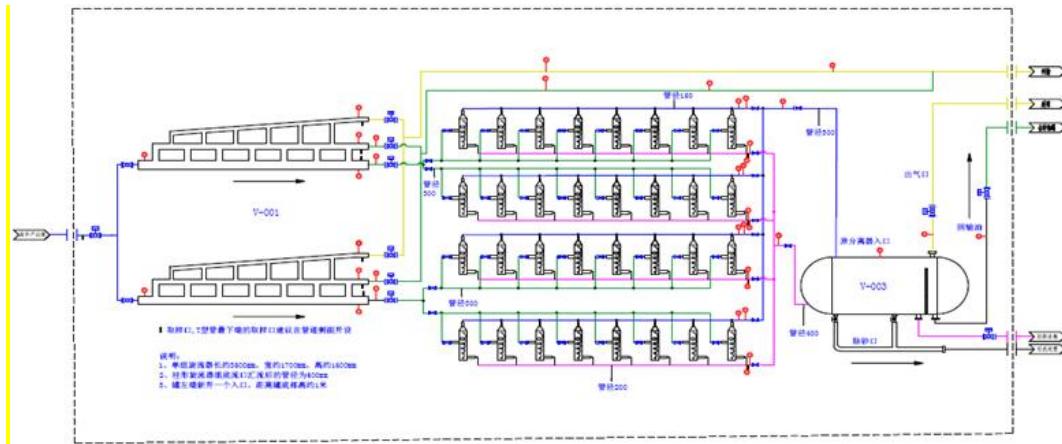
含油率小于 500mg/l，积杂小于 500 mg/l。



应用案例 2：为解决某油田接转站为了回注水水源问题，通过集成气液 T 型分离、油水 T 型分离、油水旋流分离、水平旋流油水分离和 S 管技术，在来液温度在 20°C–30°C，压力在 0.2–0.4MPa，液流量 2–25m³/d，平均含水率在 50% 情况下。利用管道式油气水分离装置达到了分离后气相不携液滴、油相含自由水低于 20%、水相含油低于 150ppm 的指标要求，分离后的达标水进入回注水存储罐，最后经过注水泵回注到水井。



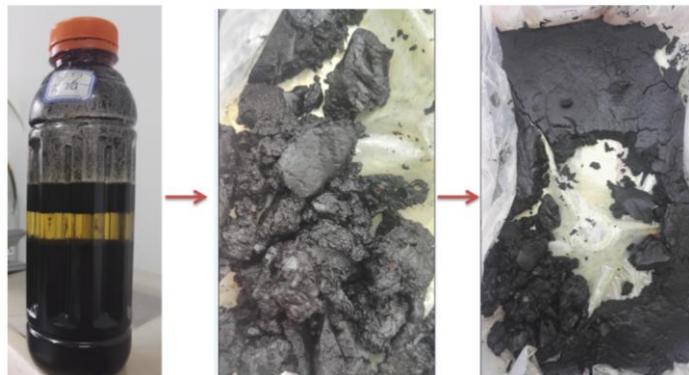
应用案例 3：将 T 型管+32 个 $\Phi 75$ 旋流管组合工艺用于海洋平台油水分离，日处理量可达到油： 9000m^3 ，气： 50000 m^3 ，水： 48000 m^3 。



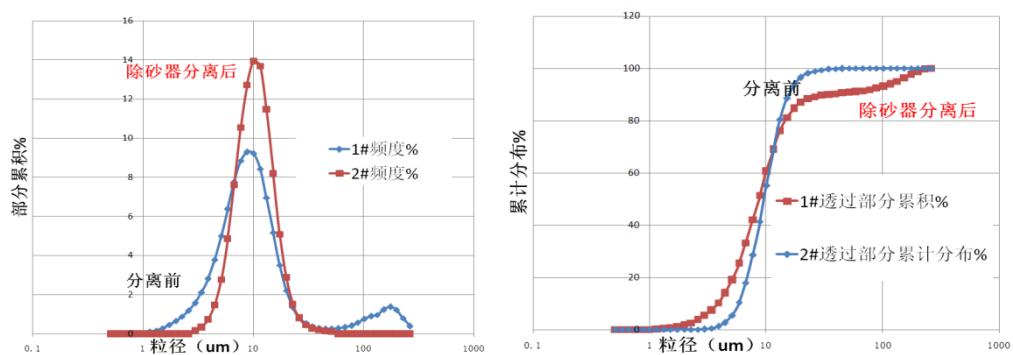
应用案例 4：为用于油田现场的直径 75mm 、长 1.5 米的柱形旋流分离器。日处理油水混合液量 600m^3 (含油 70%)。该分离器与一小型储罐结合，在脱水温度仅 32°C 超低温条件下，分离后，油中含水率低达 0.42% ，污水含油仅 1.5ppm 。该系统已在生产线连续运行 5 年，性能稳定，运行可靠，无人值守。



应用案例 5：为了解决循环水中含泥沙量高的问题，利用油田地面除砂装置，解决新疆某油田循环水的液-固分离问题，循环流量 38 方/小时，管道分离装置可以分离出 50μm 以下的泥沙，通过分离前和除砂器分离后样品粒径分布的对比看出，除砂器效果明显。



分离后样泥沙样品，沉降、晒干，固相粒径 90%以上为 3-40μm



分离前和除砂器分离后样品粒径分布的对比

4. 技术团队简介

中科院力学所应用流体力学课题组，经过长期对管道内油、气、水、砂多相流动的基础研究，创造性的提出了管道分离技术技术，并研制出相应的分离设备，特别适用于安全性能高、场地小，效率高的分离场所，通过近二十年的实践和发展，在多相流分离方面技术日趋完善，取得相关专利40 余项。

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1.	一种将互不相溶的气液两相和液液两相进行分离的装置	2005101236347	郑之初，吴应湘，张军，郭军，周永，唐驰
2.	两种不同密度介质的同向旋流分离器	2015107953648	吴应湘，史仕荧，许晶禹，李华，钟兴福，李东晖
3.	一种油田原油泥砂分离清洗装置	2016101100951	张军，郭军，钟兴福，吴应湘
4.	一种油田地面除砂装置	2016101117632	张军，钟兴福，吴应湘
5.	一种油水螺旋导流分离装置	2016105950300	林黎明，钟兴福，史仕荧，张军，吴应湘
6.	一种油水两相流型转换装置	2017105870620	史仕荧，梁楚楚，吴应湘，李华，钟兴福
7.	一种对含油污水进行油水分离的分离装置	201710444458X	钟兴福，林黎明，张军，史仕荧，吴应湘
8.			
9.	一种油水混合物的外起旋分离装置	2017104444522	林黎明，钟兴福，张军，史仕荧，吴应湘
10.	一种油水分离装置	2018100140221	林黎明，钟兴福，史仕荧，张军，吴应湘

绿色高效节能的矿石粉化技术

1. 技术介绍及特点

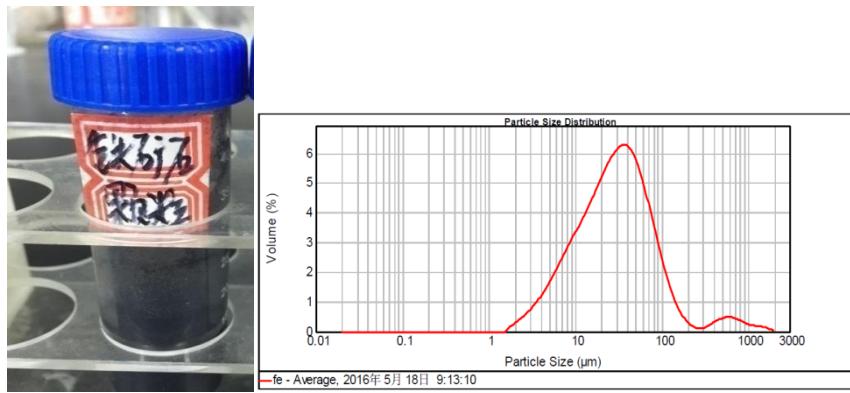
新型铁矿石粉化技术，采用高压液态 CO₂ 渗透矿石后瞬间卸压的方法对矿石进行粉化，生产微米级别矿粉颗粒。基于理论研究和实验数据分析，矿石粉化机理已经得到充分验证，本技术用于替代现有矿石采选流程中初破、中破、细破和碾磨工艺，使得块状矿石变为微米级别的矿粉一步到位，服务于新型矿石粉化技术的工业化。该方法是一种绿色、高效、节能的矿石粉化方法。

2. 应用领域

本技术主要应用于将块状矿石一次性粉化为微米级别的矿粉颗粒。可用于铁矿，铝土矿，铜矿、锡矿，石灰石等微米级别矿粉的直接生产。生产工艺简单，流程短，耗能低，可大幅降低矿石粉化成本。

3. 技术成熟度及应用案例

矿石粉化技术是一项突破性技术，中国科学院力学研究所工程地质体力学及其应用研究组陆续开展了中小尺度高压实验舱的液态 CO₂ 卸荷粉化矿石试验，已实现铁矿石、石灰石、铝土矿、页岩、碳化硅、铜矿、锡矿等多种矿石的直接粉化，铁矿粉粒径分布曲线见图 1；同时采用了初始高灌装压力、驱替、初始高水压、高压气体推动等多项原创工艺，试验测试结果已验证其技术可行性和有效性。



(a) 赤铁矿粉样本

(b) 铁矿粉粒度分布曲线

图 1 赤铁矿粉及粒度分布曲线

4. 技术团队简介

李世海，研究员，力学博士，负责技术的总体规划，“973”项目首席科学家；范永波，工程地质学博士，技术实验总负责人；冯春，高级工程师，负责技术的理论分析及数值模拟；乔继延，工程力学博士，负责项目的实验分析；程鹏达，工程力学博士，负责项目市场化运行；张丽，工程力学硕士，负责项目的组织和管理；马照松负责矿石粉化数值模拟高性能算法研究；周东提供矿石粉化数值模拟的高性能计算技术；林钦栋负责开展实验工作；杨田负责实验数据的整理和分析；

- 李世海，承担相关科研项目国家自然科学重点基金“强冲击荷载及内部气体集聚条件下地质体材料的力学行为”；国家先导专项B“页岩储层压裂数值模拟及软件开发”；宏大爆破公司横向项目“基于数字模拟的露天爆破设计软件开发”
- 范永波，力学所知识创新项目“液态 CO₂ 卸荷粉化铁矿石机理研究”；国家自然科学基金项目：“等应力循环荷载下土石混合体动强度衰减试验及数值模拟”
- 冯春，鞍钢矿业公司横向项目“基于采选总成本的爆破技术优化研究”；国家重点研发计划项目“隐伏采空区陷落致灾机理研究”

5. 知识产权情况

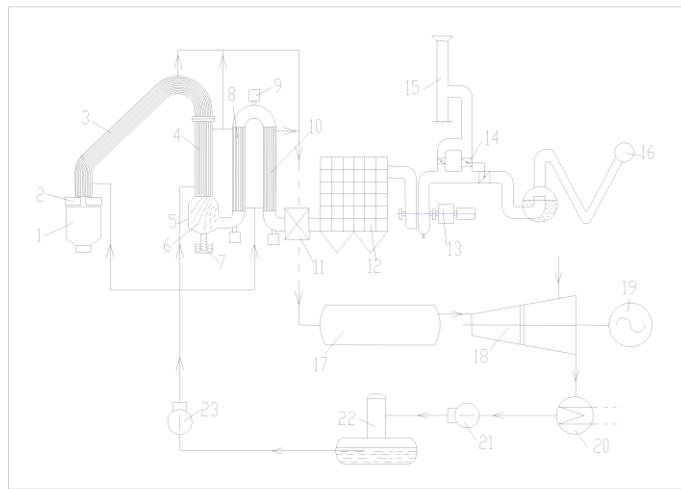
目前，已申请 7 项国家发明专利，知识产权属于中国科学院力学研究所。

序号	专利名称	申请公布号	发明人
1	一种高压气体碎化铁矿石试验装置	CN105486628A	李世海，范永波，冯春，乔继延等
2	一种岩石类材料破裂特性试验系统及方法	CN105865929A	李世海，范永波，郭汝坤，周扬等
3	一种液态 CO ₂ 制备水泥粉体的方法	CN106334615A	李世海，范永波，乔继严，冯春等
4	一种液态 CO ₂ 制备陶瓷粉体的方法	CN106045526A	范永波，李世海，乔继严，段文杰等
5	一种高效节能的液态 CO ₂ 卸荷粉化铁矿石装置及方法	CN106733054A	范永波，李世海，段文杰，乔继延
6	一种高压液态 CO ₂ 破碎铁矿石装置及方法	CN105772189A	范永波，李世海，乔继严，冯春等
7	一种低温高压液态 CO ₂ 置换装置及其使用方法	CN106368655A	段文杰，李世海，范永波，乔继延等

转炉烟气全干法余热回收技术

1. 技术介绍及特点

该技术针对炼钢转炉低品位余热烟气间断性、多尘性、具有爆炸性等特点，结合目前 850~1000°C 以下的烟气直接通过喷水或喷雾冷却而余热无法利用现状，开发出具有完全自主知识产权的低品位复杂余热高效利用及综合发电技术，该技术集成了先进可靠防爆技术、大容量高精度蒸汽蓄热稳流技术、紧凑高效间歇性热源余热换热技术、高效清灰技术、饱和蒸汽发电新技术等，使得炼钢转炉烟气全干法余热完全回收，有效降低企业能耗和水耗，实现“负能炼钢”节能减排。



全干法烟气余热回收与发电系统设备流程图

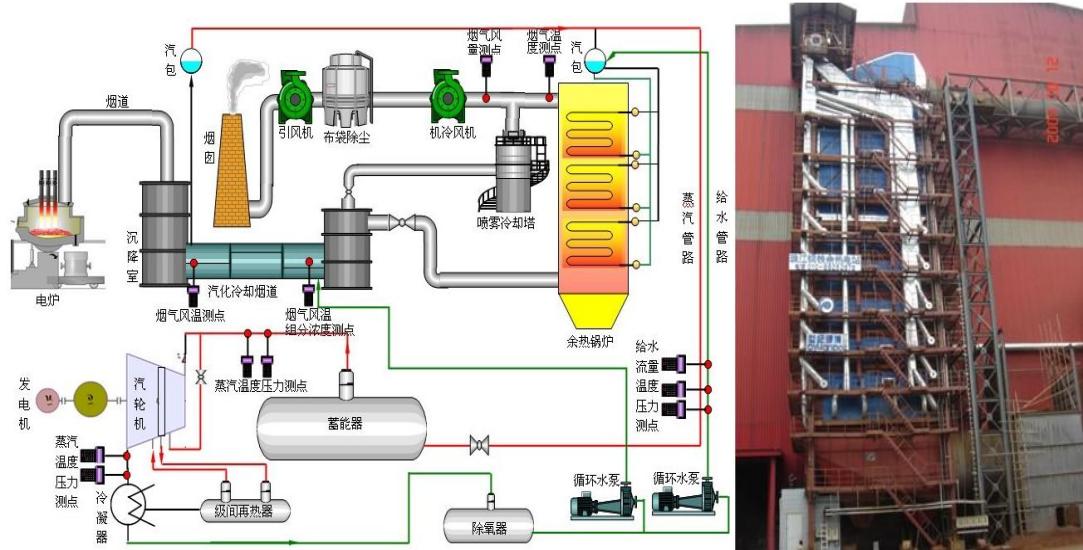
2. 应用领域

该技术可应用于冶金行业和化工生产行业烟气余热回收领域。以冶金行业为例，若在整个冶金行业应用本系列技术，每年节约标准煤 4050 万吨，发电 1060 亿度，减排 CO₂ 9500 万吨，产生经济效益 203 亿元，市场需求巨大。

3. 技术成熟度及应用案例

该技术目前已成熟，已与海陆重工签署“转炉烟气余热全干法利用技术”合作协议，联合推广应用。该技术应用案例：

- (1) 唐山春兴 2.24 MW 转炉蒸汽拖动二次除尘风机工程
- (2) 济钢一炼钢转炉饱和蒸汽 4.5MW 余热电站工程
- (3) 广州珠江钢铁电炉 10 MW 烟气余热电站工程
- (4) 陕西东岭锌业 13 MW 饱和蒸汽余热电站工程
- (5) 云南斗南锰业铁合金电炉 5.5 MW 余热电站
- (6) 云南建水锰矿铁合金电炉 12 MW 余热电站
- (7) 湘钢烧结线 4.5 MW 余热发电工程
- (8) 包头稀土焙烧回转窑烟气节能工程
- (9) 湘钢烧结线 4.5 MW 余热发电工程



广州珠江钢铁电炉 10 MW 烟气余热电站工程



唐山春兴 2.24 MW 转炉蒸汽拖动二次除尘风机工程

4. 技术团队简介

中科院力学研究所余热利用技术团队在学科带头人吴承康院士和负责人魏小林研究员带领下，主持完成了 863 计划重点课题“低品位余热高效发电新技术与装置研制”、中科院节能减排重大项目“工业煤气生产及显热回收发电新技术”、国家自然科学基金项目“转炉炉气高效燃烧低污染排放控制机制研究”、国家自然科学基金项目“转炉煤气爆燃的发生、发展及遏制机理”，在冶金和电力企业取得了显著的应用成绩，曾获得国家技术发明二等奖及中科院科技进步一、二等奖 6 项，获国家发明专利 20 余项，建设完成了 10 MW 电炉烟气余热发电、2.24 MW 转炉余热蒸汽拖动除尘风机示范工程以及 300 kW 有机工质朗肯循环中试平台等项目。

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	炼钢转炉煤气干法回收及其显热发电系统	ZL200810102268.0	魏小林；余立新；陈恩鉴；吴承康；张春林；李腾；李博；张宇；
2	应用于炼钢转炉煤气回收的爆炸遏制系统及方法	ZL200910076236	余立新；魏小林；李博；李腾；张宇；
3	气脉冲除灰装置	ZL93224560.9	孙文超；陈以理；何蔚琅；满秀芬；阎明山；詹焕青；陈丽芳；
4	具有安全保护功能的燃烧气脉冲除灰装置	ZL01207797.6	余立新；孙文超；詹焕青；陈丽芳；吴承康；

超临界 CO₂ 发电循环技术

1. 技术介绍及特点

水蒸气朗肯循环是应用最普遍的发电循环，但该循环存在两个发展瓶颈，在低温热源领域，其效率非常低，甚至无法正常运行；在高温热源领域，其效率极限约 40%，很难进一步提升。

以 CO₂ 为循环工质的新型发电循环应用范围非常广泛，用于 90°C 低温热源时，仍能正常发电运行，用于 700°C 热源时，即达到 50% 以上的发电效率。此外，CO₂ 发电循环系统结构紧凑，在空间、舰船等狭小空间领域具有良好的发展前景，还可应用于太阳能、地热能、工业余热能、甚至核能。

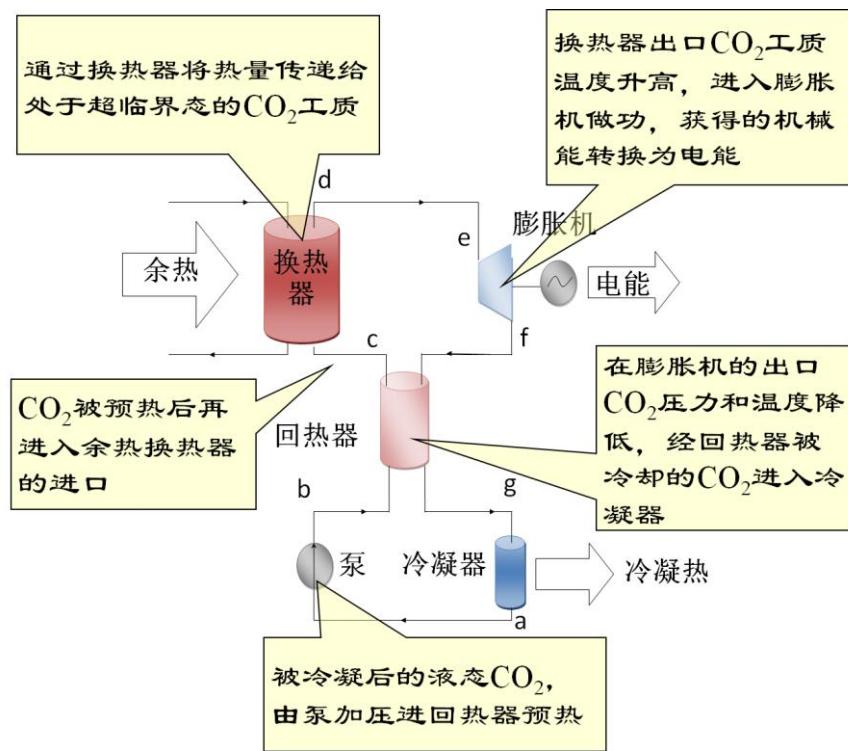


图 1 CO₂ 发电循环系统

CO_2 作为一种自然工质，广泛存在于自然界和工业过程中，无毒、阻燃，环境友好，易于提纯，成本低廉，是一种极具发展潜力的循环工质。

2. 应用领域

CO_2 的低沸点特性决定了它可广泛应用于低品位热能发电领域，包括工业余热、地热能、低温太阳热能等。在低温热能发电领域，在效率方面远高于以水蒸气为循环介质的朗肯循环，在工质环保特性方面优于有机工质。

CO_2 热稳定性较强，因此与有机工质相比，仍可应用于高温热能发电领域，如高温太阳热能、生物质能、核能、化石能源等，其发电效率远高于以水蒸气为循环介质的朗肯循环。

综上， CO_2 发电循环是一个具有普适性的技术，其应用范围非常广泛，可大幅提升能源利用率。

3. 技术成熟度及应用案例

中科院力学所已经建成 kW 级 CO_2 跨临界发电循环实验样机，最高发电 1.7kW。

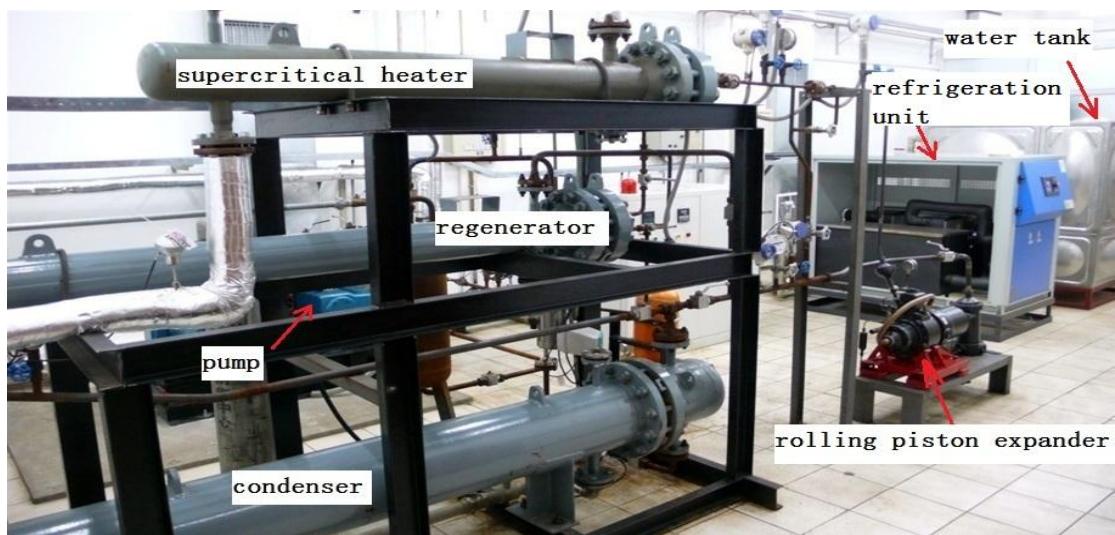


图 2 CO_2 发电系统样机

4. 技术团队简介

中国科学院力学研究所洁净燃烧与余热利用科研团队立足于冶金与电力领域，主要在燃料洁净燃烧及余热高效利用等方面开展研究开发与工程示范。在节能和燃烧领域先后多次承接了国家计划及中国科学院的重点项目等科研项目，在冶金和电力企业取得了显著的应用成绩。团队曾获得国家技术发明二等奖及中科院科技进步一、二等奖 6 项，获国家发明专利 20 余项。

目前洁净燃烧与余热利用团队形成了一支 20 余人的研发团队和工程队伍，其中研究员 1 人，副研究员 4 人，博士 5 人，在研发方面具有雄厚的基础和力量。

科研团队始终面向国家重大需求，秉承工程科学思想，积极与企业深入合作，努力为国家的节能环保工作做出更要贡献。

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	一种 CO ₂ 实验系统液态工质充灌装置及方法	ZL20151004984 4. X	潘利生，魏小林，李博，李腾
2	以 CO ₂ 为主要组元新型动力循环混合工质及其系统和方法	ZL20141004276 3. 2	潘利生，魏小林，李博
3	跨临界动力循环装置及方法	ZL20141004288 6. 6	潘利生，魏小林，李博
4	一种低品位热能的循环发电实验平台	ZL20151004192 0. 2	潘利生，魏小林，李博，李腾

燃气诊断系统

1. 技术介绍及特点

基于可调谐吸收光谱测量技术(TDLAS)，针对目标组分的特征分子转动、振动光谱开展吸收探测(不同频率下的光强衰减)。该技术可实现对燃烧或气流中的 H₂O、CO、CO₂、NH₃、NO、HF、H₂S 等组分的在线检测。结合中红外激光器和多种信号调制技术，可实现对燃烧中间产物和污染物的诊断，例如 NO、N₂O 和 NO₂ 等。

设备主要特点是：探测精度高、实时无干扰、自动化程度高。

设备简介：

例如用于航空发动机燃气诊断的燃气分析仪：针对航空发动机地面试验台的复杂振动、电磁环境，将激光器、激光控制模块、采集模块、信号输出控制模块和数据处理模块全部安装于电磁屏蔽机柜中，放置于发动机试验控制室内，如图 1 所示。测试的发射探头和接收探头安装于燃烧室出口，机柜与探头间分别经过光纤和数据电缆远程连接，无需其他部件。控制机柜和试验端间距可间距 100 米甚至更远。

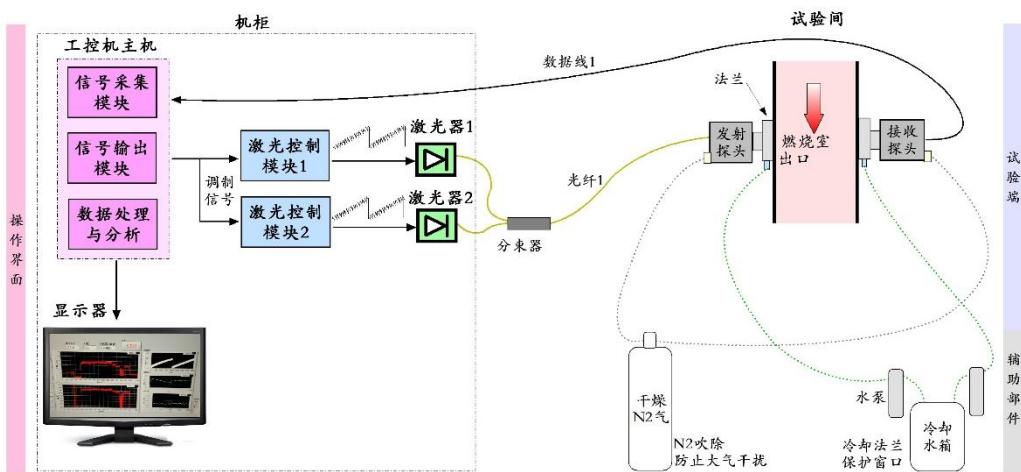


图 1 燃气分析仪硬件结构示意图

图 2 为典型的软件界面，它是针对温度测试的双通道 TDLAS 系统。利用两条近红外 H₂O 吸收谱线，测量频率高达 5kHz。图中数据为该设备诊断燃气风洞出口参数的实时结果，燃气风洞中富含 H₂O，测量信噪比良好，本系统可使用直接吸收或波长调制探测方法。

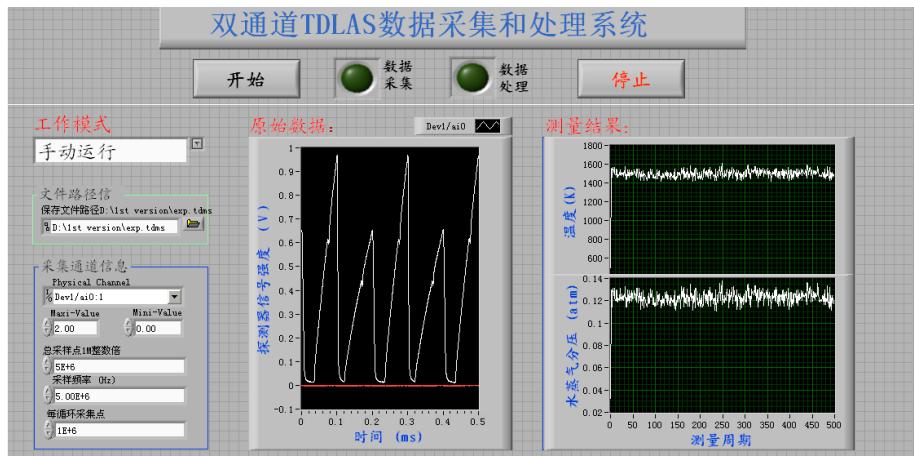


图 2 燃气分析仪操作软件界面

图 3 为典型的硬件设备实物照片，它是温度、浓度多参数测试的复杂系统。同时测量燃气的温度、H₂O/CO/CO₂ 浓度。设备机柜中的最上端为显示器，中间为工控机，下部为两套燃气控制箱，驱动和处理 4 台激光器的输出和返回信号。



图 3 燃气分析仪实物照片

2. 应用领域

- 发动机诊断
- 污染物排放监测
- 高精度温湿度计
- 特种环境下组分浓度控制等

3. 技术成熟度及应用案例

技术成熟度 7 级：原理样机及模型发动机上多年应用。

4. 应用案例

1) 超燃冲压发动机燃烧诊断；

同时测量燃烧室入口、燃烧室内和出口的燃气温度、组分浓度和速度分布，为燃烧模态判别提供关键数据。

2) 卫星单组元推力器(发动机)内部的特征组分诊断；

测量发动机内部的 NO、CO 和 N₂O 浓度变化，用以研究燃烧过程和发动机性能。

3) 超导薄膜生长中的 H₂O 含量监测；

实时监测设备中的 H₂O 含量用于控制薄膜生长的气氛环境，H₂O 分压在 Pa 量级。

5. 技术团队简介

团队负责人：余西龙研究员。团队核心成员：李飞（副研究员）、林鑫（高级工程师）。本团队自 2006 年起，在国内率先开展用于燃烧诊断的 TDLAS 技术研究，并研制多种燃气诊断设备用于燃烧或气流环境。在该领域发表学术论文 20 余篇（其中 11 篇 SCI 检索）。

6. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	一种用于吸收系数标定的高温高压光学腔及其使用方法	201610443242.7(已受理)	李飞, 曾徽, 余西龙

先进制造

先进水下吸声阻尼材料——声子玻璃复合材料

1. 技术介绍及特点

水下吸声阻尼材料是具有吸收声波、降低目标声特征信号、使水下潜器难以被发现和识别的功能材料。随着声科学与技术的发展和各学科的相互融合，水下吸声阻尼材料器件的应用也越来越广泛，在军用技术中有着极其重要的地位和迫切的需要。由于高机动性和隐蔽性，水下航行器成为当代军事技术中最具威慑力的水下武器装备之一。隐蔽能力是水下航行器的最重要性能，它对水下航行器的战技性能有着直接的、重要的影响。电磁场、声场、地磁场、水压场等特征信号通常都可能使水下航行器暴露，但由于各种因素的限制，使声场成为最主要的目标特征。因此，水下航行器的隐蔽性主要归结为声隐身能力，它是提高水下航行器生存能力和战斗力的最有效手段。研究表明，水下航行器的声辐射每降低 6dB-10dB，敌方声呐作用距离将会降低 50%，己方声呐的作用距离可以提高一倍。水下吸声阻尼材料不仅能够降低水下航行器目标强度，又可以抑制其辐射噪声，还可以用于降低声呐平台自噪声的综合技术，在水下航行器声隐身中有着广泛的应用。一方面它可以在宽频范围内对声波进行有效吸收，降低声呐回波和声目标特性，从而缩短敌方主动声呐的探测距离；另一方面利用材料自身的阻尼和隔声作用，减少自噪声向外辐射，实现水下航行器安静化。开发性能优异的新型水

下吸声阻尼材料对我国海军装备发展和国防军工建设有着重要的现实意义。

相比较于传统的橡胶一类高分子材料，声子玻璃复合材料不仅具备优异的水下吸声性能，同时也具备了良好的力学特性，其综合性能先进性具体如下：

轻质：声子玻璃复合材料是由开孔泡沫铝材料与聚氨酯复合而成的，材料整体密度约为 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ ，当设计为水下吸声阻尼元器件时，其密度可优化至 $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ ，该密度远低于现有水声阻尼材料。

宽频强吸声性能：声子玻璃复合材料在常压下 $500\text{Hz}-10\text{kHz}$ 内吸声系数大于 0.8，远宽于传统的水下吸声材料的吸声频带，可以覆盖现有声呐的吸声频段，实现无泄漏吸声。此外，相比较现役吸声材料，声子玻璃在低频表现出更好的吸声效果，其所需材料厚度远低于现有水下吸声材料。

耐压吸声性能：声子玻璃材料最高可以抵御 6MPa 的静水压力，且在该压力作用后能够恢复变形，该抗压性能远高于传统的橡胶一类的高分子材料。此外，同时对压力不敏感，在 3MPa 及 4.5MPa 压力下也获得了宽频强吸声，它突破了传统水下吸声材料耐压性能与吸声性能不能兼顾的矛盾。

良好的隔声性能：声子玻璃复合材料具备良好的隔声性能，在 $500\text{Hz}-10\text{kHz}$ 频率范围内最小隔声量 5dB ，平均隔声量大于 20dB ，使声子玻璃可以作为水下隔声材料用于声呐平台等部位。

优异的阻尼特性：相比较传统的船用阻尼材料，声子玻璃复合材料具有良好的阻尼性能，利用它可以与现有阻尼结构相结合制备处高阻尼、高强度的阻尼结构。

2. 应用领域

XSW: 声子玻璃复合材料具备良好的水下吸声性能与抗压能力，可开发为新型 XSW，可满足水下航行器在大潜深及复杂服役环境的应用需求。

铺板、基座等结构件：声子玻璃材料具备良好的阻尼特性及力学特性，它可以设计为新型轻质铺板和水下航行器基座，切断噪声的传播路径，降低机械声辐射。

SN 平台非透声界面：声子玻璃复合材料兼顾吸声性能的同时具备良好的隔声特性，这使其可以用于声呐平台等特殊部位，能够有效降低自噪声，提高 SN 设备灵敏度。

3. 技术成熟度及应用案例

经过大尺寸模型缩比实验，对声子玻璃水下阻尼吸声材料在 XSW、基座、铺板等部位的潜在应用开展了应用探索研究，目前技术成熟度已达五级。



图 1 声子玻璃实物样品

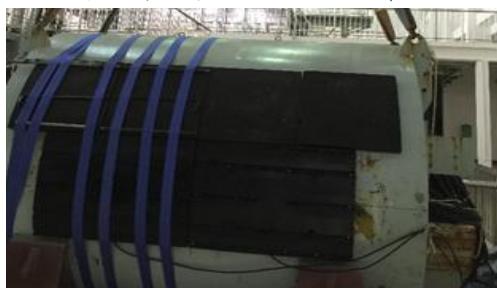


图 2 XSW 压力罐测试图



图 3 轻围壳模型图



图 4 铺板模型图

4. 技术团队简介

王育人，1966年5月生，现任中国科学院微重力重点实验室主任、研究员、博士生导师。主持和参与国家自然科学基金重点项目、面上项目、国家973项目、装备发展部背景型号预研项目、海军装备部探索项目、中科院先导A类项目、B类项目、中科院创新重要方向项目、中科院重大装备研制项目等多项课题。现任军委科技委某专家组成员、装备发展部某背景型号预研项目副总师、中国空间学会微重力专业委员会委员、中国核学会工程力学分会理事、中国有色金属学会理化检验学术委员会、哈尔滨工程大学超轻材料与表面技术教育部重点实验室学术委员会委员。在水声材料与空间材料

科学等方面，发表 SCI 论文 80 多篇，含 Nature Communications, Phys. Rev. Lett., JACS, Appl. Phys. Lett., J. Acoust. Soc. Am. 等期刊。

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	一种基于网络结构的吸声复合材料及其制备方法	CN101334993	王育人、姜恒
2	一种压电陶瓷和碳材料的复合制备方法	ZL201410245397.0	冯亚菲；姜恒；陈猛；王育人

高能脉冲磁控溅射 (HiPIMS) 技术及工程应用

1. 技术介绍及特点

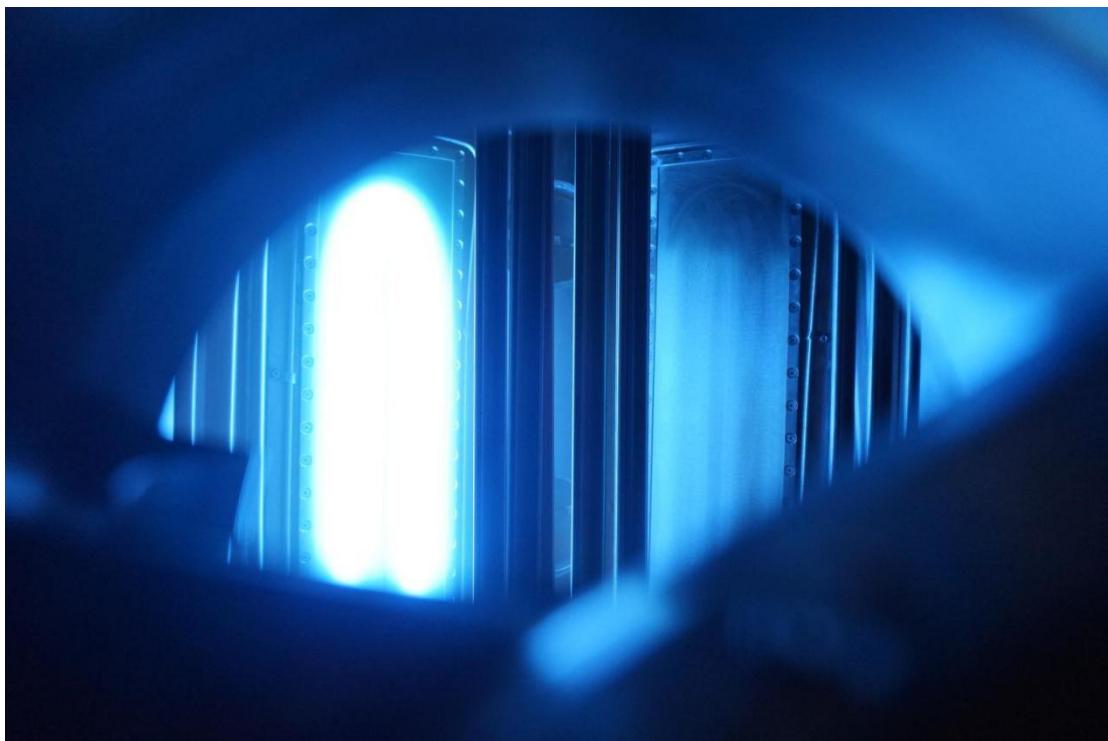
高能脉冲磁控溅射技术是利用较高的脉冲峰值功率和较低的脉冲占空比来产生高溅射金属离化率的一种磁控溅射技术。力学所引进德国 huttinger 电源，与等离子体淹没离子注入沉积 (PIII&D) 方法相结合，形成一种新颖的成膜过程与质量调控技术，是可应用于大型矩形靶的离化率可控磁控溅射新技术，填补了国内在该方向的研究空白。将高能冲击磁控溅射与高压脉冲偏压技术复合，利用其高离化率和淹没性的特点，通过成膜过程中入射粒子能量与分布的有效操控，实现高膜基结合力、高品质、高均匀性薄膜的制备。

同时结合全新的粒子能量与成膜过程反馈控制系统，开展高离化率等离子体发生、等离子体的时空演变及荷能粒子成膜物理过程控制等方面的研究与工程应用。其核心技术具有自主知识产权，已申请相关发明专利两项。

该项技术对实现 PVD 沉积关键瓶颈问题的突破具有重大意义，有助于提升我国在表面工程加工领域的国际竞争力。如在交通领域，该技术用于汽车发动机三部件，可降低摩擦 25%，减少油耗 3%；机械加工领域，沉积先进镀层可使刀具寿命提高 2~10 倍，加工速度提高 30-70%；综上所述，该装备系统将在卫星通讯、等离子物理、新材料等领域具有重要的工业应用价值。



高能脉冲磁控溅射等离子体发生与成膜控制平台



工作中的高能脉冲磁控溅射靶

2. 应用领域

- 工模具高温涂层：汽车、航空航天、军事等先进制造行业应用
- 稀土铝耐蚀薄膜：NdFeB 磁铁行业环保涂层应用

- 太阳能薄膜：光伏发电及新能源领域应用
- 生物工程薄膜：生物医用领域应用

3. 技术成熟度及应用案例

技术成熟度：中试阶段

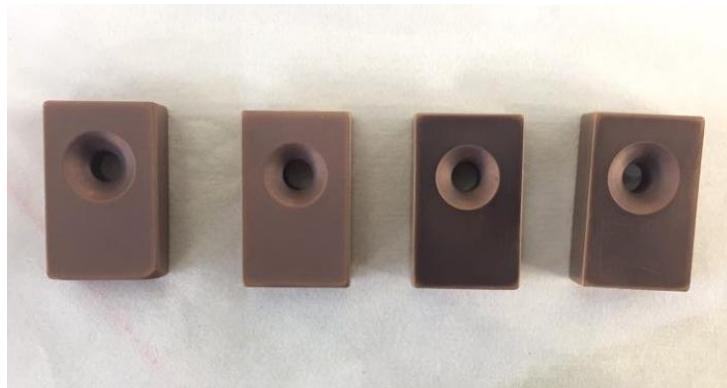
应用案例 1：与长春一汽开展合作。中科院力学所采用高能脉冲磁控溅射技术及多弧离子镀技术开发了 TiCN、AlCrN、CrAlSiN、DLC 等系列三元、四元高硬高温涂层，应用于长春一汽的压铸模具、热锻模具，可使其加工寿命提高 3~5 倍以上，尤其是含钇高温涂层，在国内率先实现了 800~1200°C 环境下热锻模具的薄膜工程应用。国内高端模具真空镀膜处理的需求市场份额在 100~150 亿元之间。

应用案例 2：承担内蒙古自治区重大科技专项。中科院力学所利用高能脉冲磁控溅射技术，研发获得超薄、致密、耐蚀 Al₂O₃/Al 复合层、AlMn 纳米多层膜等多品种的新型镀层体系。在钕铁硼表面沉积新型镀层，致密度好、能保证尺度精度，同样耐腐蚀寿命下厚度为电镀层的 1/5，在冷热交变环境下的防腐能力较强，耐盐雾能力达 500~1000h，可满足海上风电、高铁列车、高速电机及手机等行业对磁材高耐腐蚀性要求。该技术为绿色环保的先进制造新技术，是磁铁行业表面处理最有生命力的新方法。在烧结 NdFeB 磁体高强耐腐蚀方面的应用前景广阔。





汽车用 PVD 涂层模具



高强耐腐蚀涂层磁体

4. 技术团队简介

力学所在低温等离子体研究方面有深厚的工作基础，对低温等离子发生、输运及诊断等方面进行了系统研究工作，尤其在真空薄膜沉积方面的研究工作有近二十年的工作积累。科研团队的研究方向主要包括金属表面陶瓷化研究，磁控溅射离子镀、真空阴极弧离子镀硬质膜的制备和结构性能研究；发表论文 70 余篇，获十余项国家发明专利，获省部级科技进步三等奖 3 项。完成了十余项国家及省部级课题的研究工作，完成我国第一台工业化非平衡靶磁控溅射-全方位离子注入机的研制，完成多套真空阴极弧离子镀及磁控溅射设备，以及一套具有国际领先水平的高能脉冲磁控溅射高离化率镀膜装备系统。

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	一种用于磁控溅射的高低压转换装置	ZL201410652562.4	夏原，李光，朱洪亚
2	一种用于动车车头的涂层组合	ZL201410662845.7	李光，夏原，刘仁等
3	一种气体射流式冲蚀磨损试验机	ZL201410471504.1	夏原，李光，杨苗苑
4	多气氛及真空环境下测量材料摩擦行为的装置	ZI2008102255461	夏原，李光，徐方涛

混动汽车全铝发动机缸体内壁陶瓷化技术

1. 技术介绍及特点

混合动力汽车要求发动机重量进一步减轻，三缸全铝发动机能够有效减小发动机的体积和重量，省油的同时也能为发动机舱留出更大的空间。铝合金具有质量轻、比强度高、易成型、导热性好及热膨胀性低等优点，发动机采用铝合金，可减低汽车自重，从而降低油耗，提高发动机效率和汽车的行驶性能。

本技术针对全铝发动机缸体内壁陶瓷化设计成套生产线，在缸体内壁制备耐磨抗蚀陶瓷涂层，可显著提高铸铝发动机的服役寿命。陶瓷涂层的热障效应能够降低气缸内热量损失和发动机冷却的需求，从而提高发动机功率，降低排放量。同时，为了解决新型燃料乙醇汽油对缸体内壁造成较大腐蚀的难题，通过本技术在缸体内壁涂覆的抗腐蚀先进陶瓷涂层，可实现国家节能减排重大工程中醇醚燃料代油以及生物质柴油的目标。

2. 应用领域

- 混动汽车发动机
- 三缸高强铝合金发动机
- 油田管式抽油陶瓷泵

3. 技术成熟度及应用案例

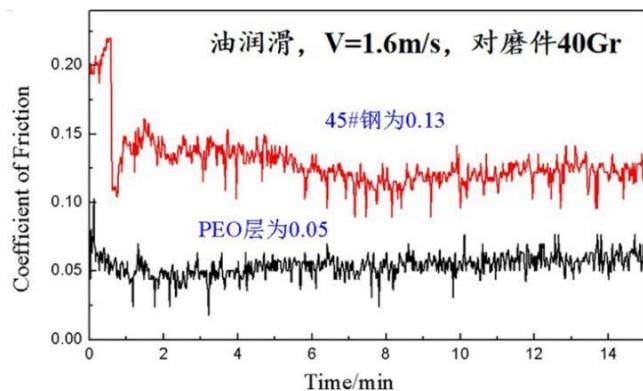
技术成熟度：中试阶段

应用案例：与长城汽车股份有限公司开展合作，联合承担了题为《超强铝镁合金及涂层和其用于车缸体缸盖研究》的中加国际科技合作专项。双方联合开发了高强度全铝发动机缸体，并且攻克了一系列产业化应用的关键技术，实现了压铸铝合金发动机缸体内壁

的工业化 PEO 陶瓷层处理。获得了高速油润滑条件下摩擦系数为 0.05 的 PEO 涂层体系，较缸体/缸套对副的摩擦系数降低达 50%。6 小时的发动机性能检测台架试验结果显示，陶瓷层具有优异的耐磨损和耐腐蚀性能，功率高于原机 13.6%，油耗低于原机下降 5.7%，达到了项目的预期目标，为实现年产量 40 万件缸体陶瓷化工业化生产线应用奠定了基础，为推动交通行业节能减排和可持续发展重要战略提供重要的技术保障。



缸体内壁陶瓷化实验系统



高速油润滑下的 PEO 涂层摩擦系数



长城科技展展览

4. 技术团队简介

力学所在表面工程等方面有几十年的工作积累，承担了铝合金发动机缸体的“压铸铝合金（YLADC12）微弧氧化表面处理”项目，获重庆市科技进步奖。团队负责人夏原研究员主要从事材料工艺与力学、材料表面科学及薄膜技术等研究工作。发表论文 60 余篇，主持完成了中科院装备研制计划、中加国际科技合作专项等 10 余项国家及企业课题的研究工作，获 10 余项国家发明专利。实验室拥有 60kW 等离子体电解氧化专用电源，建立高能脉冲磁控溅射装备平台，建立了薄膜性能检测实验系统。聘请了国际著名教授 Allan Matthews 作为力学所钱学森讲座教授。与加拿大温莎大学、加拿大福特公司、英国施菲尔德大学建立了密切的合作关系。



李家春院士与英国 Prof. Matthews 合影



加拿大合作者来访技术交流会

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	一种等离子体电解氧化陶瓷涂层的刷镀成膜装置及方法	ZL200910241967.8	夏原、段红平、雷现奇
2	一种金属表面陶瓷化处理方法	ZL2004101028388	夏原、吴振强、关永军
3	铝合金缸体内壁陶瓷涂层的等离子体电解沉积方法及装置	ZL02160209.3	夏原、关永军、李方春

YAG 激光毛化技术及装备

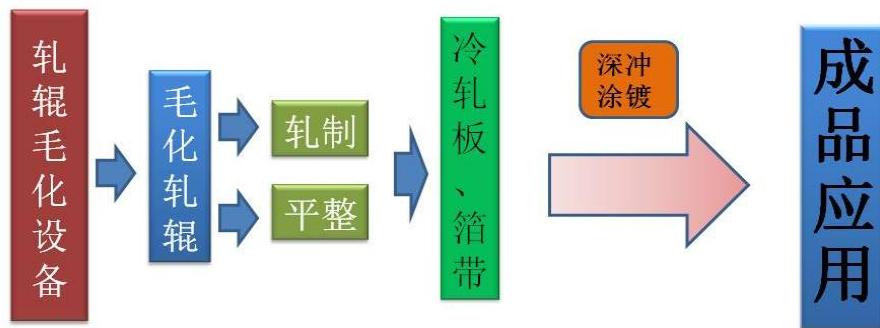
1. 技术介绍及特点

YAG 激光毛化技术是中国科学院力学研究所研创发展的材料表面形貌改性技术。该技术的应用，可有效抑制金属表面微裂纹的萌生和发展，提高部件使用寿命；可有效增加表面涂镀层的结合力，减小涂镀层的开裂剥落；在有润滑条件的摩擦副表面，能有效减少摩擦副表的摩擦系数，改善密封。

中科院力学所已售出 27 台套 YAG 激光毛化冷轧辊装备在工厂运行。其毛化设备及加工方法已经成熟运用在钢铁冶金的精密带钢、冷轧薄板、镀锌板、镀锡板、不锈钢板带的生产上。激光毛化能够提高轧辊使用寿命、减少辊耗、克服退火粘连，对板、带能够提高产品冲压性能、改善表面涂镀附着力，增加光亮度，改善板型等。



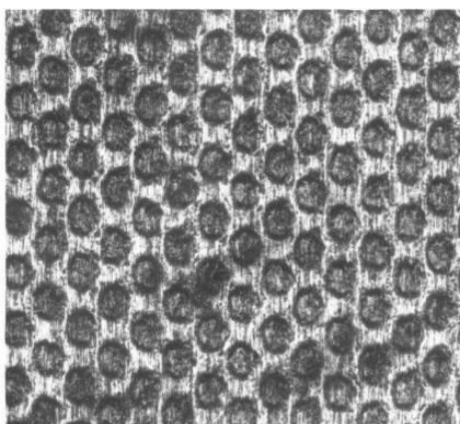
优质冷轧板带箔表面必须要有一定的粗糙度形貌，以提高其成型性能和涂镀性能。毛化板带箔表面的这种粗糙度形貌是由轧辊毛化后通过轧机轧制转移的。



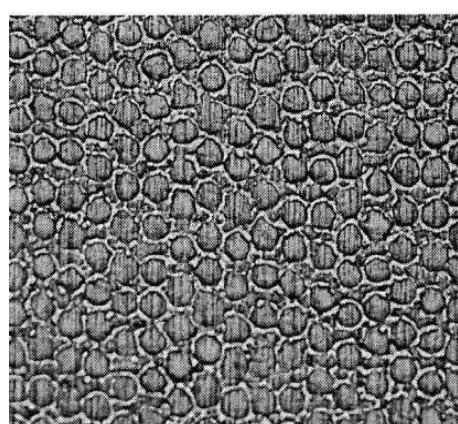
YAG 激光毛化是通过特殊的声光调制将连续的 YAG 激光转化为高重频脉冲激光束，然后聚焦到旋转轧辊表面，以形成分布均匀的带熔凝凸台微坑来实现辊面毛化。

技术特点：

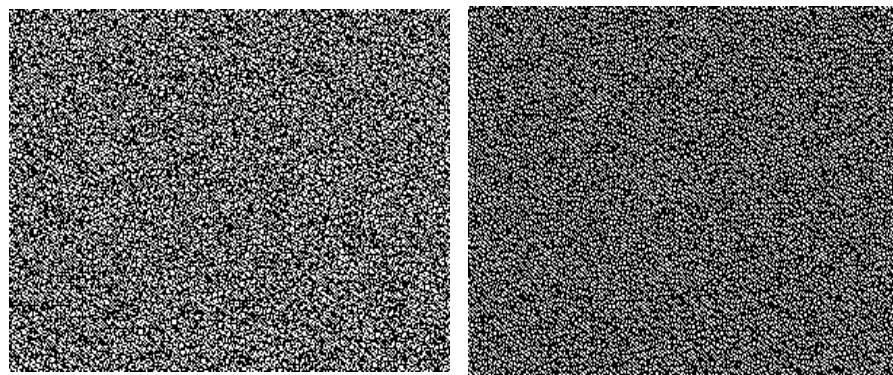
- 高重频脉冲激光波形调制技术
- 二维可控分布毛化技术（及图形刻蚀技术）
- 全随机分布毛化技术
- 轧面自动对焦系统



可控分布板



半随机分布



全随机分布板面
YAG 激光毛化冷轧辊扎装备



大型激光毛化设备主要用于年产 50 万吨以上冷轧板材的钢铁企业，中型激光毛化设备主要用于年产 20~50 万吨冷轧板、带的中型钢铁企业，小型激光毛化设备主要用于年产 20 万吨以下冷轧板材的中小型钢铁企业。

以大型激光毛化设备为例，其具体参数为：

1、可毛化轧辊最大尺寸：

辊径：650mm，辊面宽：2500mm，全辊长度：5000mm，辊重：
6t；

2、辊面可毛化粗糙度范围： $R_a=0.5\sim6.5 \mu m$ （可调）；

3、辊面毛化点密度：线密度：3~9 点/mm 或面密度：9~81 点/

mm^2 (可调) ;

4、毛化点凸台硬度： $Hv \geq 850$;

5、激光器基本性能参数：

波长： $1.06 \mu\text{m}$;

输出连续功率：400W， 功率不稳定度 $<3\%$;

调制频率范围：5~25kHz 可调

6、毛化点可控分布，有序及随机分布，辊面跟踪控制功能。

7、设备总重：12t

设备占地面积： 60m^2

工作环境温度： $0^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$;

毛化能力：可每天三班连续工作。

中型激光毛化设备：

可毛化轧辊最大尺寸：

辊径：450mm，辊面宽：1600mm，全辊长度：5000mm，辊重：5t；

小型激光毛化设备：

可毛化轧辊最大尺寸：

辊径： $<300\text{mm}$ ，辊面宽：1500mm，全辊长度：3000mm，辊重：3t；

针对不同的设备需求，具体技术参数可以根据实际需要调节。

● 毛化产品及效果

1、应用产品：

钢铁工业：冷轧毛化薄钢板（带）、镀锌板（厚 0.4~1.2 mm）

马口铁（厚 0.18~0.25mm）锡锡板，镀铬板

毛化精密带钢（厚 0.04~0.35 mm）

有色冶金：亚光铝、铜板、不锈钢带（厚 0.1~1.0 mm）

亚光铝、铜箔（厚 0.015~0.040 mm）

特种合金板带毛化。

2、应用效果

钢铁冷轧薄板（带）：（厚 0.04—1.2mm）

激光毛化轧辊优点：	激光毛化板（带）优点：
毛化粗糙度均匀可控	提高板带延伸率，
克服板带退火粘连	深冲性能好
减少辊面残余应力，集中减少表面剥落	涂镀层附着力强，
可加大轧辊制压下量，	涂漆光亮度高
增加轧板速度	改善板（带）焊接性能
使用寿命比喷丸辊长	有效改善板形，减少表
面划伤	面划伤

有色冶金（铝、铜、板带箔）优点：

已开发出新型亚光（anti-reflected）铝板箔产品（板厚 0.2—1.0mm，箔厚 15—100μm）。

毛面铝箔粘胶结合力好，不起皱。

可减少板箔延伸率级差（0° 和 90° 方向）

改善板面质量，克服表面划伤和布丝、松枝纹缺陷

毛化辊使用寿命长，可减少轧制道次，提高生产效率。

YAG 毛化板深冲件：



汽车车门



电池壳、邦迪管

发动机缸体内壁激光刻蚀技术

1. 技术介绍及特点

缸体-活塞环是发动机实现能量转换的最重要的一对摩擦副。发动机正常工作时，本身的摩擦损失在内燃机燃料消耗中约占 10% 的比例，而缸体-活塞摩擦损耗又占其中 60%。因此，减小缸体-活塞环之间的摩擦损耗，可有效节省燃油。另一方面，而缸体-活塞环之间密封缺陷，易引起高温高压燃气漏入曲轴箱，机油窜入燃烧室，增加污染排放。因此减小缸体-活塞环的摩擦损耗，改善密封条件，是发动机节能减排的关键。

我们技术的思路是：在缸体表面加工可控微细形貌，这些离散分布微坑可存储润滑油而不易流失，在活塞环运动时，由于挤压作用，微坑中的润滑油会在坑周围形成油膜，不同微坑油膜的相互作用，在缸体-活塞环间形成均匀完整的油膜，使这对摩擦副处于流体润滑状况，既有效减小了缸体-活塞环间的摩擦系数，又可改善密封。当活塞环运动过后，由于负压影响，润滑油又可收敛于坑中，这些储油的离散分布微坑起到了液体微轴承的作用。

这种离散分布微坑表面结构与传统的互相连通式机械珩磨纹相比，可使摩擦副摩擦系数大大降低，同时提高了发动机的动力性能和燃油经济性能。

2. 应用领域

该技术不仅可用于汽车厂、内燃机厂、缸套厂的规模生产，还能对在役汽车通过各汽车维修站进行改造，提供一种对现役汽车节能减排改造的有效手段，可以预计，该技术很有应用推广前景。

本技术同时对其他机械摩擦组件的改善润滑和密封，减小摩擦、降低磨损和提高密封性能具有重要的意义，可以为激光微细形貌刻

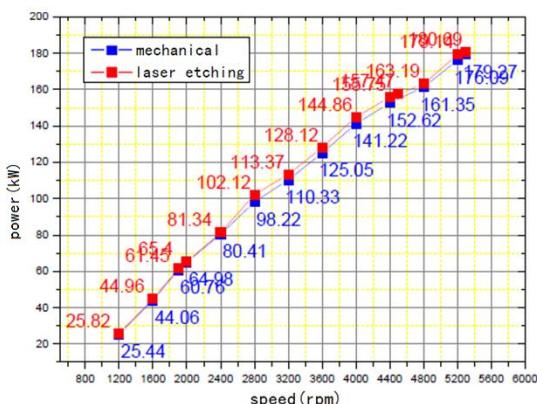
蚀机械摩擦副润滑和密封的控制提供技术手段。

3. 技术成熟度及应用实例

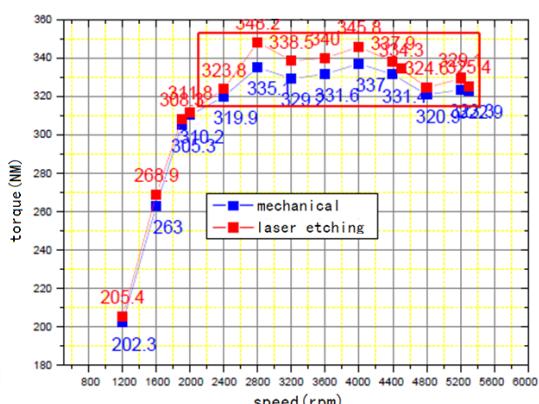
该技术在发动机缸体中的应用，对发动机的进一步节能提供了一种有效技术手段。在缸体（套）内表面进行激光微细造形，减小摩擦副间的摩擦，改善密封。在已进行的发动机台架实验结果看，激光毛化珩磨缸体与常规机械珩磨缸体相比，发动机扭矩提高 4%，功率提高了 3-4%，机油消耗降低了 20%以上，柴油机尾气排放中的颗粒物降低了 30-50%，初步显示了该技术节能减排综合效果。该技术不用改变现有发动机的已有结构，同时加工速度快 (<3 分钟/缸孔)，处理成本低。应用实例有：

1) 北汽集团 B235 发动机台架试验

检测地点：天津中汽研工程院 K8 试验间。

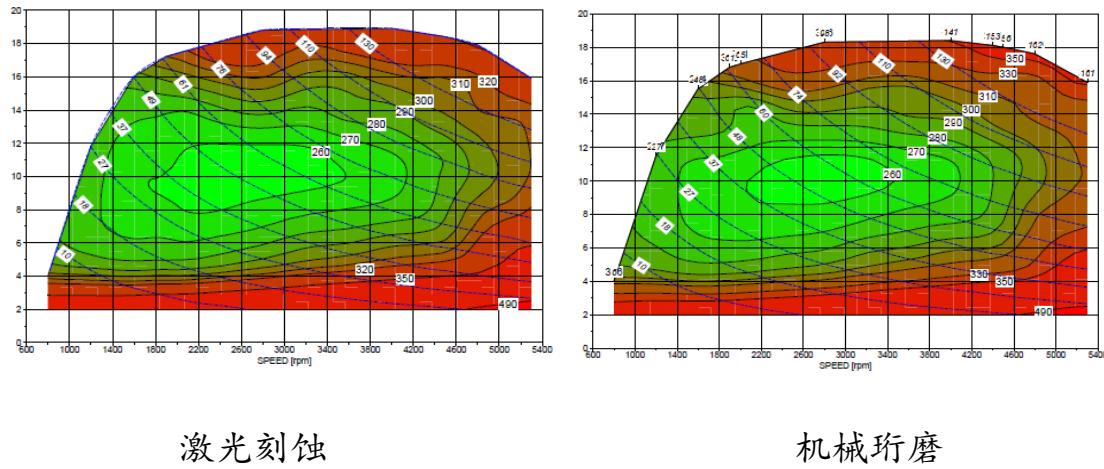


功率最大提升 3.97%



扭矩最大提升 3.31%

动力性能



激光刻蚀

机械珩磨

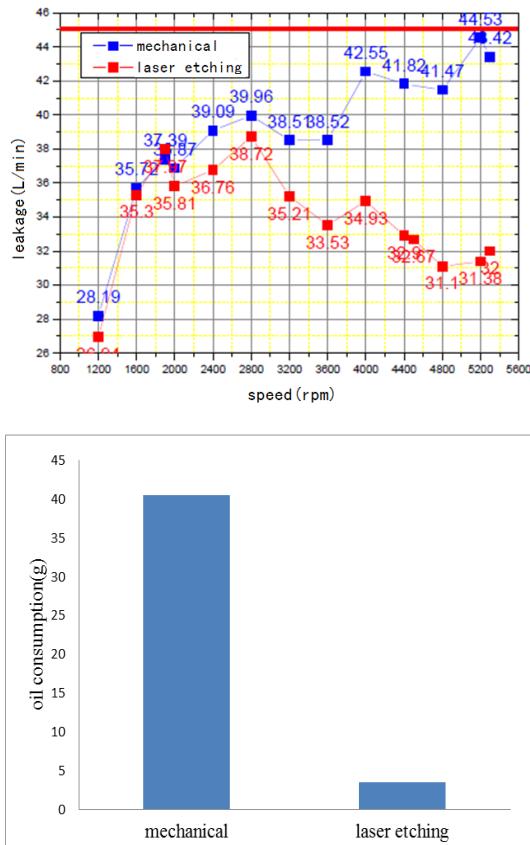
万有特性

通过万有特性云图，对发动机燃油耗区域面积进行统计，得出燃油经济性对比，见表 1。

表 1 燃油耗区域面积对比

油耗区域 (g/kWh)	机械珩磨	激光刻蚀
≤ 255	0. 05%	0. 78%
≤ 260	4. 82%	7. 66%
≤ 270	18. 24%	23. 3%
≤ 280	33. 84%	38. 74%
≤ 290	46. 38%	49. 28%
≤ 300	56. 14%	58. 44%
≤ 310	65. 35%	68. 34%
≤ 330	78. 88%	75. 81%
≤ 350	88. 55%	89. 86%
≤ 490	99. 72%	99. 77%

万有特性试验结果显示：对比于原机，采用激光刻蚀处理后发动机最低油耗明显降低，且低油耗区域面积大于原供发动机。

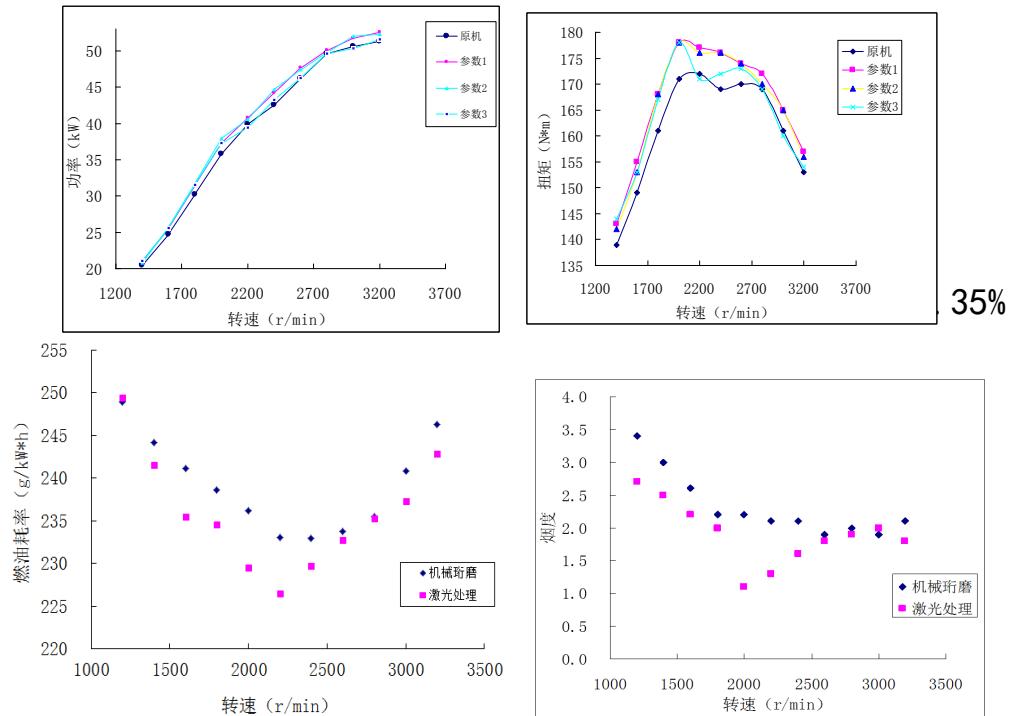


活塞漏气 机油耗

试验结论：通过台架试验检测结果对比，激光刻蚀处理后发动机各项性能指标均优于原供发动机，其中，动力性能中功率和扭矩分别最大提升了 3.97% 和 3.31%；万有特性试验中最低油耗明显降低，燃油耗 $\leq 255 \text{g/kWh}$ 区域面积增加了 14 倍，燃油耗 $\leq 260 \text{g/kWh}$ 区域面积增加了 58.92%，燃油耗 $\leq 270 \text{g/kWh}$ 区域面积增加了 27.74%，增加了发动机的燃油经济性；活塞漏气量最大降低了 29.53%；机油耗降低了 91.35%。

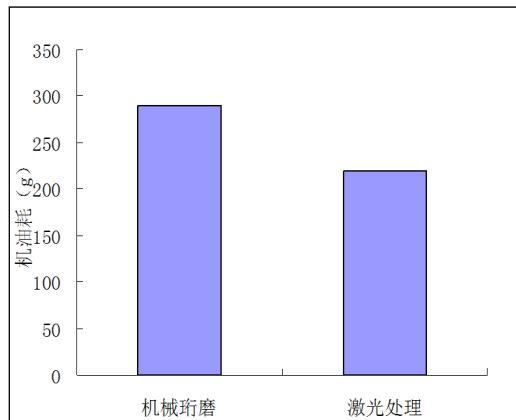
2) 山东莱动台架试验

检测地点：山东华源莱动内燃机有限公司。



燃油耗最大降低 4.03%

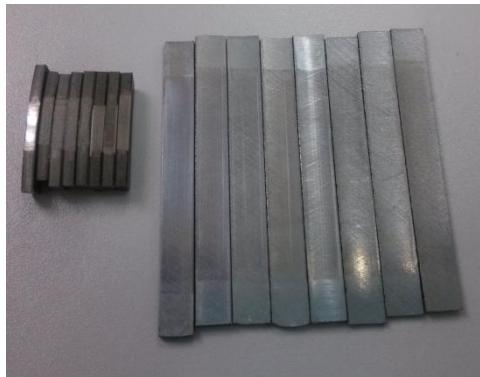
尾气烟度最大降低 50%



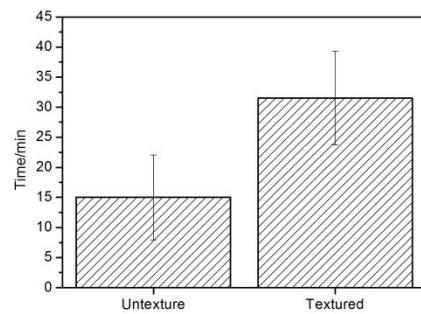
机油耗降低 24.14%

试验结论：采用激光刻蚀后发动机各性能均高于原机，其中：
动力性能中功率和扭矩分别最大提升了 5.54% 和 4.35%；燃油耗最大
降低了 4.03%；机油耗降低了 24.14%；烟度最大降低了 50%。

3) 万斯特镀铬缸套摩擦磨损性能试验



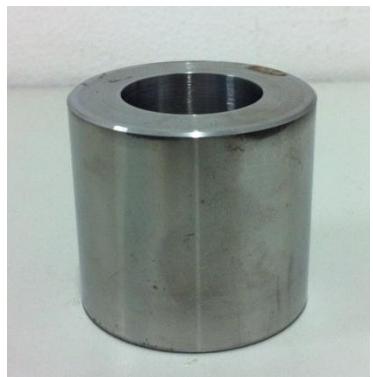
缸套、活塞环试样宏观形貌



抗拉缸时间对比图

试验结论：表面微坑加工可提高抗拉缸性性能约 1 倍。

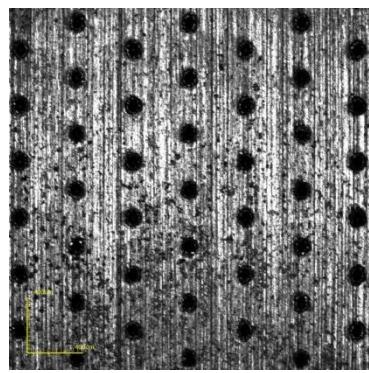
4) 大连海事大学衬套-活塞销配副磨损试验



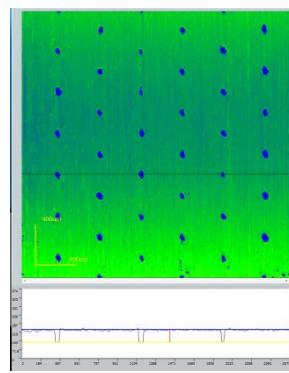
活塞销试样实物



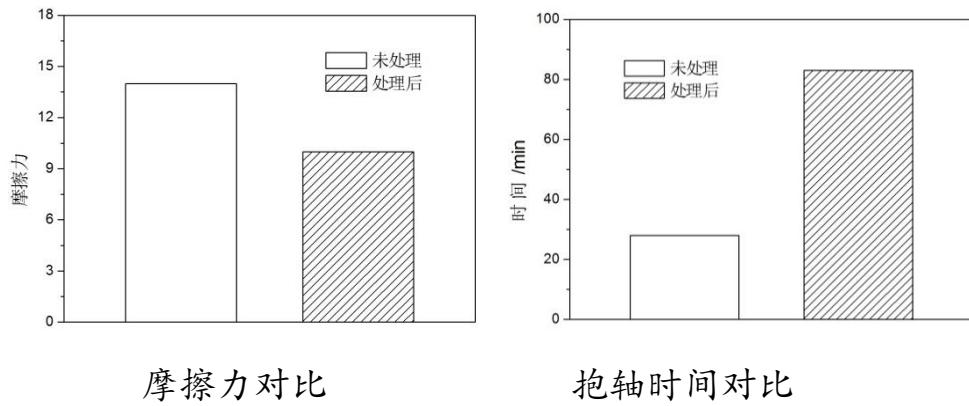
衬套试样实物照片



激光刻蚀衬套内表面形貌



微坑的测量



试验结果：由摩擦力对比图可知，激光处理后衬套-活塞销配副的摩擦力降低了 40%。相对于未处理衬套-活塞销配副的抱轴时间为 28min，处理后衬套-活塞销配副的抱轴时间为 83min，时间延长了近 2 倍。

4. 技术团队简介

中科院力学所激光毛化课题组是缸体（套）内壁激光刻蚀技术工艺的主要研究力量，现有八名员工，高级职称四人，具有技术研发、工艺研究、装备研制的综合实力，同时具有激光刻蚀特有的高重频脉冲激光波形调制技术，可控分布毛化技术，刻蚀激光器和深孔内旋转激光头研制能力，有光机电一体化装备研制能力，具有自主知识产权。

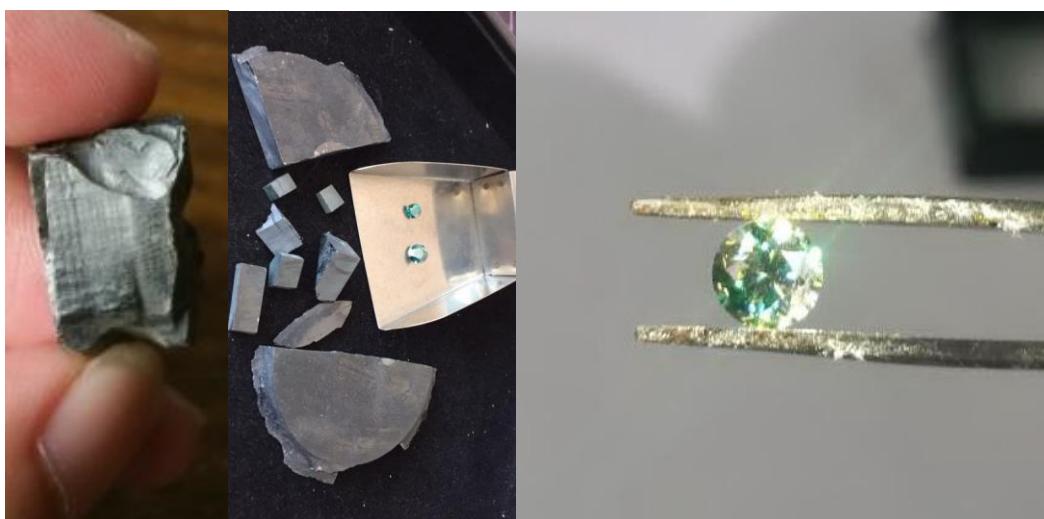
5. 知识产权情况

序号	专利名称及专利号	专利完成人	专利简介
1	一种内燃机缸体内壁激光刻蚀加工装置、201510041886.9	占剑等	本发明公开了一种缸体内壁激光刻蚀的加工装置，所述装置包括激光装置、机床、控制三部分。本发明在激光毛化技术基础上提出脉冲激光微坑刻蚀加工速度快，效率高。
2	一种用于薄板激光高速焊接的气体保护夹具装置、201210493259.5	占剑等	本发明公开了一种实现薄板高速对接焊接所需的夹具设计，及在高速运动过程中防止焊缝氧化的气体保护装置设计。确保在高速焊接过程中激光作用区域无氧气进入，在焊接件的下表面形成封闭式的气体保护腔，达到气体保护的作用，从而增加焊缝质量。

高质量碳化硅晶体材料生长及加工技术

1. 技术介绍及特点

项目技术基于传热学及流体力学理论以及晶体生长模型化和数值模拟手段，利用实验室自行研制的 PVT 法碳化硅单晶生长炉，对实验室生长碳化硅单晶的技术进行了探索及改进。目前已解决影响碳化硅材料量产的关键技术科学问题，2-4 英寸晶体产品质量达到国际先进水平。自行研制 4 英寸-6 英寸碳化硅 PVT 晶体生长炉，已掌握高纯度碳化硅粉（99.999%）的合成技术及高质量单晶生长技术。



神奇的化学：原料合成 $\text{Si} + \text{C} = \text{SiC}$, $\xrightarrow{\text{PVT 生长}}$ 莫桑钻加工。

2. 应用领域

天然的碳化硅存在于罕见的莫桑石中。合成碳化硅（Synthetic Moissanite）又名合成莫桑石、合成碳硅石（化学成分 SiC），色散（0.104）比钻石（0.044）大，折射率（2.65-2.69）也略大于钻石（2.42），具有与钻石相同的金刚光泽，火彩更强。

主要研发碳化硅单晶生长高温真空炉、碳化硅单晶生长及衬底加工技术，高纯碳化硅粉合成技术。高质量的 4H 和 6H 半绝缘型 2—4 英寸碳化硅单晶衬底及氮化镓外延片，主要用于外延生长碳化

硅和氮化镓材料，用于制作新一代高效节能的电力电子器件、高效 LED、微波器件。

3. 技术成熟度及应用案例

经过 10 余年的研发，已经解决了晶体生长中热流控和微流控问题。通过专利授权的方式进行项目的研究和产业化工作。“3 英寸半绝缘碳化硅单晶生长技术”于 2014 年通过了中国高科技产业化研究会组织的科技成果鉴定（科技成果登记号：6032014Y0217，发证日期：2014 年 12 月 25 日）。专家一致认为，高温低压晶体生长控制技术达到国际先进水平，在微波器件、电力电子器件及 LED 器件方面具有广阔的应用前景。

4. 技术团队简介

主要以微重力实验室技术团队为主。陈启生博士，中科院力学所研究员，博士生导师，中科院百人计划。1997 年在中科院力学所获得博士学位。1997 年—2001 年在纽约州立大学石溪分校机械工程系先后作为博士后和研究科学家。2001 年—2004 年兼佛罗里达国际大学机械和材料工程系教师。

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	一种利用籽晶温度梯度方法生长碳化硅单晶的装置	ZL20121016939 9.7	陈启生，颜君毅，姜燕妮

气动雾化法生产微细球形铝合金粉末生产工艺技术及设备

1. 技术介绍

气动雾化法生产微细球形铝粉及其生产技术在国际上受到以美国为首及其盟国制定的“导弹技术控制制度”(MTCR)的限制。中国科学院力学研究所致力于微细球形铝粉的生产研究最早可追溯到1984年，解决了航空航天快速凝固高强铝合金材料的气动雾化制粉问题。1990年在国家重点战略武器研制“31”工程中，解决了长期困扰我国的固体火箭燃料微细球形铝粉的生产技术问题。1993年制定的国家军用标准《特细铝粉规范》GJB1738-93，其产品列入其中。随着我国经济的飞速发展，特别是轿车用高档金属颜料和太阳能光伏电池电极背铝浆需求，使得此项技术不断发展完善和提高。近年来国内外金属粉末注射成型(MTM)和3d打印等先进制造技术的日臻完善，在我国先进的MIM制备技术产品和市场已经开始成熟，金属粉末的3D打印技术正在起步和发展，对 $d_{50} \leq 20 \mu\text{m}$ 特别是 $d_{50} \leq 10 \mu\text{m}$ 的球形非晶微晶金属粉末需求迅速增长。多年来超细球形铝粉已多年被列入科技部发布的《中国高新技术产品目录 2006》中，序号：06010056。2007年我国制定了《氮气雾化铝粉》YS/T620-2007的行业标准，2014年上升为国家标准《铝粉 第4部分 氮气雾化铝粉》GB/T2085.4-2014产品标准，此标准在产品品种、技术规格等方面，现在是世界上独一无二的。中科院力学所已有三十多年该项技术成果转化的实际经验。到目前为止，已有三十多套不同生产规模(单套装置生产能力150-4000吨/年)的球形铝粉生产线在国内外安全运行。年产能达到十几万吨的规模。年产值达十几亿元人民币。力学所现有的气动雾化法制备微细球形金属粉末生产专利

技术完全可以满足市场的要求。对国民经济的发展有重要的意义。此项技术在生产安全、生产能力、规模、产量、细粉收率 ($d_{50} \leq 10 \mu\text{m}$) 、工作环境、生产成本等均处于世界领先水平。

中科院力学所此项目获奖等情况：

1986 年航空部科技进步二等奖

1987 年中科院科技进步二等奖

1989 年国家科技进步二等奖。

1991 年中科院科技进步一等奖

1992 年国家科技进步三等奖

1993 年列入“国家级科技成果重点推广计划”项目。

1999 年《氮气雾化法生产微细球形铝粉工业性试验项目》被列为国家重点工业性试验项目

2. 技术成果特点

- 将铝粉主要生产过程，包括雾化制粉、粉体冷却、粒度分级、气力输送和粉体包装联为一体，形成封闭系统，有效地降低了噪声和粉尘污染，改善了工作环境。由于有氮气保护，大大提高了生产过程的安全。
- 主要生产设备根据铝粉最大爆炸压力来设计，并且安装有爆破膜泄爆和氧分析仪监测系统氧含量，氧含量超出临界点便自动报警，保证生产过程安全。
- 根据先进气动原理设计的雾化器，能在低能耗下生产平均粒径小于 $45 \mu\text{m}$ 的微细球形铝粉。
- 离心分级器和旋风分级器串联使用，一次能分出两种以上不同粒径的产品。产品粒度在 $2-45 \mu\text{m}$ 之间可调，精度达 $\pm 0.5-3 \mu\text{m}$ 。

- 收集下来的铝粉通过气力输送系统输送到包装间，铝粉在一个半封闭，通风除尘柜中包装，防止粉尘在空气中飞扬，保证安全。
- 熔融铝液在氮气保护下雾化，保证生产高质量的球形铝粉。
- 氮气循环使用，大大减少气体的消耗，用一台小型制氮机补充氮气（也可用液氮蒸发），可大大降低生产成本。
- 装置可单独作为分级系统使用。
- 主要工艺参数，如温度、压力、压差、氧含量，都通过二次仪表在中央控制台集中显示和报警，一些工艺过程实现自动操作。
- 系统连续运行，年生产日达 300 天以上。

3. 应用案例

我们提供的雾化铝粉装置产品主要应用于化工催化剂、金属热喷涂、农药、炼钢脱氧剂、铝热法冶金、导电浆料、铝镁碳不烧砖、金属颜料和防腐涂料、烟花炮竹、固体火箭推进剂、火药、炸药等。特别是 2000 年以后，微细球形铝粉正在逐步取代传统空气雾化的铝粉产品。汽车用高级金属颜料用微细球形铝粉，已成为基本原料。在国家绿色新能源领域的太阳能光伏电池的迅猛发展，微细球形铝粉也已成铝背板的基本原料。氮化铝陶瓷材料由于其优异的热导率、热膨胀系数、各种电性能、机械性能、耐高温、耐热冲击、抗腐蚀等性能，在电子、冶金行业正在得到广泛应用，微细球形铝粉是氮化铝制备的基本原料。微细球形铝合金粉在粉末冶金、金属粉末注射成型和 3D 打印等，在无切削或少切削制造各种复杂零件中，能够加工出传统机械加工方法无法制造的复杂零件，成为制造革命的新亮点。其产品广泛应用于汽车、航空、航天、医疗器械、电子零件等各行业。



烟 花 爆 竹



炼 钢 脱 氧 剂



化 工 行 业



粉 末 冶 金 及 复 合 材 料



金属颜料



导电浆料



导热材料



高档耐火材料

目前国内应用本项技术的主要微细球形铝粉生产厂有：吉化公司高碳醇厂（引进法国 PECHINEY HERMILLON 空气雾化装置，经本项目技术改造后生产微细球形铝粉）。湖南金天铝业科技股份有限公司（2015 年挂牌上市，金天高科股票代码： 832008）、湖南金昊新材料科技股份有限公司（2016 年挂牌上市，金昊科技股票代码： 839508。）、湖南泸溪金马粉体材料有限公司、湖南泸溪金源粉体材料有限公司、湖南泸溪县群祥新材料有限责任公式、湖南宁乡吉唯信金属粉体有限公司（已被日本东洋铝收购）、鞍钢实业微细铝粉有限公司、河南省远洋粉体科技股份有限公司（2015 挂牌上市，远洋科技股票代码： 836902。）、山东东营金茂铝业科技有限公司公司、西安航天化学动力厂精细材料公司、中国航天科工集团第六研究院内蒙古福来特铝粉厂等，其技术均采用本项目工艺技术。现年生产能力约 15 万吨。其中可用于高级金属颜料和太阳能光伏电

池、氮化铝等的微细球形铝粉年产量已达到约 12 万吨左右，粒度 $d_{50} \leq 10 \mu\text{m}$ 的收率 50–90%。

4. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	微细金属粉末生产装置	200510004921.6	王吉南
2	延长紧耦合雾化器稳定生产时间的方法及紧耦合雾化器	201711102568.4	王吉南
3	一种提高雾化效率的紧耦合环矩形孔气体喷嘴雾化器	201711102587.7	王吉南
4	一种提高雾化效率减小液滴直径的紧耦合雾化器	201711102588.1	王吉南

复合速凝水泥注浆及配套工艺

1. 技术介绍及特点

随着我国经济快速发展，大量电站、矿井、公路、铁路等重大项目相继建设，其中部分工程涉及穿越富水区地层，高压突水、涌泥是最突出的灾害性问题之一。近年来这类灾害时有发生，造成了人民生命和财产的重大损失。

注浆法是治理水害的最常用方法。目前注浆法仍存在不足，如注浆液易被冲蚀、高外水压致注浆孔封闭失败、浆液流动范围无法控制等。

复合速凝水泥注浆采用自研速凝剂孔口混合、注浆孔孔口阻塞等技术。水泥浆液和速凝剂分别经各自管路到注浆孔孔口，在注浆管内混合后进入地层中如图 1 所示。速凝浆液凝固时间从 30 秒至数分钟可控，速凝浆液形成膏状体如图 2 所示。

技术特点：

- 1) 复合速凝浆液可有效抵御流水冲蚀；
- 2) 孔口模袋阻塞可实现高外水压孔口封闭；
- 3) 基于流固耦合模型可以指导注浆设计，优化注浆工艺；

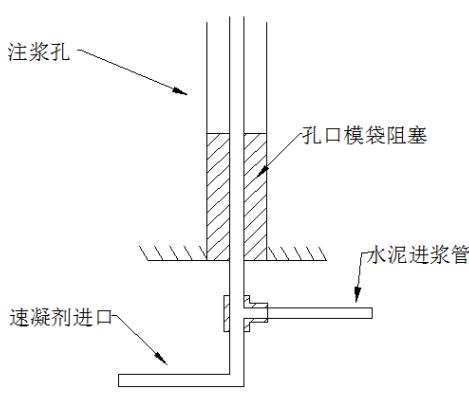


图 1 速凝剂注入方式示意图

图

图 2 速凝浆液膏状体示意

2. 应用领域

隧道突涌水、基坑漏水、水电站防渗帷幕、地下水污染源隔离等

3. 技术成熟度及应用案例

该技术已经成功应用于多个工程，如：

- 1) 四川叙大铁路中坝隧道溶腔塌方治理 (2017)
- 2) 重庆沙坪坝双碑隧道涌水治理 (2013)
- 3) 北京地铁 6 号线粉砂治理 (2013)
- 4) 云南大瑞铁路大柱山隧道断层塌方治理 (2011)
- 5) 沪蓉西高速公路龙潭隧道泥石流塌方治理 (2010)



西南地区某隧道突涌水抢险

4. 技术团队简介

从 2009 年开始，技术团队核心成员即以速凝浆液及其流动规律为主要研究对象，在材料性能、流固耦合机理及数值模拟、现场试验等方面取得了一定研究成果。针对地下工程涌水、涌沙等应急工程，研发粘度时变注浆浆材，掌握浆液粘度变化规律，引入 Lagrange 追踪方法描述流动过程中流体物性参数随体变化，建立浆液-岩体耦合数学模型，发展基于 FE-DE-FV 方法的耦合计算方法，分析得到复合速凝注浆的控制参数，并基于这些参数开发了相关注浆技术。

技术团队分工

序号	姓名	职称	工作单位	年 龄	学历	分工 及职责
1	李世海	研究员	力学研究 所	59	博士	团队管理、把控研发 方向
2	程鹏达	助理研 究员	力学研究 所	34	博士	材料开发、技术开 发、理论分析、数值 模拟、现场试验
3	冯 春	副研究 员	力学研究 所	35	博士	理论分析、软件开 发、技术开发
4	杨 田	博士生	力学研究 所	22	学士	室内实验、数据分析

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	一种注浆孔口的阻塞装置及其使用方法	ZL201410395178.0	程鹏达、吴梦喜
2	一种模袋填充式锚固注浆装置和方法	ZL201710796824.8 (申请号)	程鹏达、李世海、冯春
3	一种泵吸降压定向注浆设备和方法	ZL201810071199.5 (申请号)	卢平、彭良田
4	一种基于电磁阻塞器的注浆孔分段装置	ZL201810111042.0 (申请号)	周刚、张立明
5	一种破碎岩体的抗滑装置及施工方法	ZL201410548556.4	吴梦喜、程鹏达、艾永平、卢吉、曹学兴

铜基合金激光高密度改性技术及应用

Surface modification of Cu-based alloys using a high density laser beam and its application

1. 技术介绍及特点

铜基合金广泛应用于轨道交通和电力行业的电接触元件，其表面失效会导致高速列车的安全事故及电网瘫痪，成为制约轨道交通运输和输变电网络发展的瓶颈问题，铜基合金的表面改性对于提高电接触元件性能具有重要意义。为保障国家特高压电网的高效安全运行，推动国家电力行业技术升级和能源战略发展，本实验室率先进行了铜基合金激光高密度改性技术的研究，解决了激光表面改性设备研制、改性工艺研究和产品及产品级技术使用规范等科学问题。突破了激光束高密度、高速度的熔凝改性和高速度、高精度、全覆盖的轨迹规划等关键技术；制成了满足生产要求的铜基合金触头样件，研制出成套铜基合金高密度激光表面熔凝改性装备。

1、改性设备研制。研究内容：高密度激光表面熔凝改性装备基于高密度激光束焦平面定位技术、高导热冷却的固定和防变形装置铜基合金表面热分布控制技术，配备有高温金属羽辉在线监测系统、高速高精度的轨迹规划软件、集成化智能控制软件及工艺数据库系统，为相关工程行业设计与发展提供支撑。在激光束焦点位置实现高密度 ($10^7\text{-}10^8\text{W/cm}^2$)、高速度 ($\sim 10^4\text{mm/min}$) 的熔凝改性（临界改性：作用时间 $< 0.6\text{ms}$ ），突破传统激光表面改性难以满足高反射、高热导材料表面改性的局限性，大幅提高改性层性能、改性层质量和加工效率。惰性气氛下样件冷却及热应力控制。研制局部循环冷却系统，实现无氧条件下铜基合金表面温度的精确控制，以及热过过程应力控制与消除，避免热积累和热应力造成加工过程的不稳定性和热变形，确保表面改性层质量。



图 1. 激光改性装备

2、激光表面改性的工艺研究。研究内容：激光功率密度、扫描速度、扫描轨迹、冷却方式、改性环境等对于铜基合金表面性能和显微组织的影响，包括改性工艺对于改性层的含氧量、致密度、Cr颗粒尺度等的影响。高速度、高精度、全覆盖的轨迹规划。针对铜基合金触头的复杂几何结构，实现高速高精度全覆盖轨迹规划，避免轨迹误差，提高系统可靠性和可控性。

3、产品及产品级技术使用规范。研究内容：研究激光改性合金的改性层厚度、表面粗糙度、接触电阻值、颗粒度对于产品性能的影响，找出相关规律。使产品设计人员在设计阶段只需提出对性能的特殊要求，激光改性可采用不同工艺进行相应针对的改性，从而实现其性能要求。

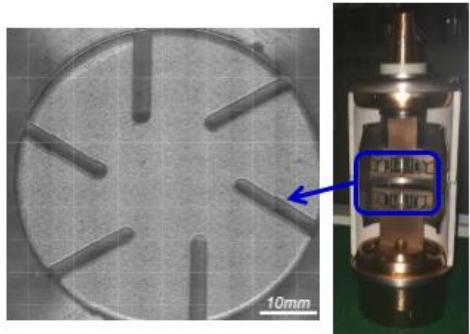
技术特点： 实现激光束高密度、高速度的熔凝改性和高速度、高精度、全覆盖的轨迹规划。

2. 应用领域

本技术可以推动实现真空灭弧室用铜基触头的规模化工业生产，
激光改性引领真空灭弧室朝长寿命、大容量发展

应用：国家特高压电网由十一五、十二五示范工程全面转向十三五期间的全面建设

现状：中国的特高压输电网是第一个满负荷商业运行电网，在世界上属于首创



问题：单回路运行停电更换设备，严重影响电网安全稳定运行

要求：作为无功补偿装置的电容器组开关投切频率大幅提高。

寿命目标≥3000次

切断电压目标：100→1000kV

迫切需要开发长寿命的电容器开关保证高电压网稳定运行！

有望广泛应用于电力行业的输变电系统，推动国家能源战略发展和电力行业技术升级，生产过程绿色化、智能化，推进激光制造在国民生活、生产的应用。

图 2. 应用领域

3. 技术成熟度及应用案例

本实验室对 Cu-Cr 合金的激光改性开展了大量工艺实验研究，引入了合适的轨迹规划以、实时在线监控、温度传感、质量控制等环节，既能深入开展机理研究，又能满足工业应用的需求。现针对 Cu-Cr 触头的表面改性技术已掌握了核心技术 and 完全自主的知识产权，已具备可供生产线使用的装备、技术及规范，满足推广条件。改性效率高、效果好：

成品率≥98%，改性效率≥1000mm²/min，Cr 颗粒直径≤0.01mm

可进行大规模、标准化生产。现与陕西宝光真空电器股份有限公司和北京京东方真空电器有限责任公司建立了合作关系，进行了配备激光改性触头的真空灭弧室的关断测试，耐压极限、关断次数等项指标均大幅提升，并针对真空灭弧室的实际工况，提出了符合企业实际的生产线配置方案。

4. 技术团队简介

本项目实行项目负责人责任制，由虞钢研究员总体负责，对项目提供理论分析及总体方案指导；何秀丽副研究员负责控制系统、激光与材料相互作用实验研究及数据库的建立；李少霞副研究员负责激光器、高密度激光装置以及实时监测系统研制；宁伟健高级工程师领导硬件装备平台的建设并主抓平台装置的设计参数、设计方案。郑彩云实验师负责材料性能测试及触头性能评；前沿科学处负责对本项目的运作情况进行监督和指导。

虞钢，项目负责人。中科院力学所研究员、博士导师，国科大工学院教授。1982 年毕业于东南大学，于 1989 年和 1992 年分别获得英国 Strathclyde 大学哲学硕士和物理学博士学位。1992 年起在英国 Heiot-Watt 大学从事博士后研究。1996 年应聘回国，现任力学所学术委员会委员，全国光辐射安全和激光设备标准化技术委员会第一、二届委员等。在激光先进制造工艺优化和质量控制、集成化激光制造系统 CAx 过程研究等方面取得了多项研究成果。完成了自然科学基金、国防基础科研等多项研究项目。已出版专著 2 部，授权专利 30 余项，发表学术论文 120 余篇。

表 1. 团队人员简介

姓名	职称	现工作专业	研制中承担的主要任务
虞钢	研究员	激光物理	项目总负责
何秀丽	副研究员	材料	相互作用及模拟
宁伟健	高级实验师	机械	光机电一体化
郑彩云	实验师	光学	气箱及辅助系统
李少霞	助理研究员	激光	高密度激光系统
张犁天	博士生	力学	改性工艺实验
张越	硕士生	控制	数据库及控制软件
王旭	硕士生	力学	数据库及控制软件

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	一种铜铬合金触头的激光表面改性方法	ZL201610157029. X	虞钢, 张犁天, 李少霞, 郑彩云, 何秀丽, 宁伟健
2	一种调整铜铬合金触头表面激光改性时运动轨迹的方法	ZL201610157060. 3	虞钢, 张犁天, 郑彩云, 宁伟健, 何秀丽, 李少霞
3	一种铜铬合金触头的激光清洗方法	201610391512. 4	虞钢, 张犁天, 郑彩云, 李少霞, 宁伟健, 何秀丽
4	一种激光表面改性的图像评价方法	201610056183. 8	虞钢, 夏纯阳, 宁伟健, 郑彩云, 李少霞, 何秀丽
5	评价激光改性时等离子体与最终改性效果之间关系的方法	201610579001. 5	虞钢, 解晓宇, 郑彩云, 何秀丽, 李少霞, 宁伟健

激光先进制造装备系统

中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室研制的“集成化激光智能制造及柔性加工系统”是一套具有自主知识产权（多项国家发明专利）的装备系统。该系统包括高功率固体激光器、高精度五轴框架式机器人、全数字化控制及反馈系统、光束柔性传输及变换系统，CAx过程数据库系统及外设辅助系统等。该系统适应现代大功率激光加工工艺要求，可作为从事激光智能制造和柔性加工研究的实验系统和工程技术平台，并满足激光制造的



工业要求，在机械、电子、航空、轨道交通等领域具有广泛的应用前景。

应测量技术等多项激光加工技术。

“集成化激光智能制造及柔性加工系统”可用于激光表面强化处理技术；大型零部件激光修复处理技术；激光焊接技术；激光切割技术；激光打孔技术；激光直接成形技术；发动机活塞及气缸盖的激光热负荷实验技术以及自适

中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室可提供“集成化激光智能制造及柔性加工系统”以及激光加工方法、技术和加工工艺。

专用软件

利科岩土工程分析软件

1. 技术介绍及特点

利科（LinkFEA）岩土工程分析软件是针对水利水电工程的渗流、堤坝的应力变形与结构安全性和边坡的稳定性计算分析而自主开发的有限元软件系统。包括渗流计算模块 LinkFEA-Seepage、渗流与应力耦合计算模块 LinkFEA-Stress 和基于有限元应力计算结果的边坡稳定分析模块 LinkFEA-Slope 三部分。该软件用 Fortran 语言开发，经历了近 20 年的水利水电工程分析应用与软件改进扩展，具有计算收敛性好、计算结果可靠等优点。能进行复杂工况下的地下水三维渗流计算、堤坝三维渗流与应力变形耦合计算、堤坝与边坡二维稳定计算。

2. 应用领域

主要应用于水利水电工程的渗流分析、堆石坝的应力变形与结构安全性分析和边坡稳定分析。近 20 年来，已经在大渡河瀑布沟、大渡河长河坝、大渡河双江口、澜沧江如美 4 个里程碑级水电站工程和雅鲁藏布江加查、澜沧江黄登、大渡河硬梁包、黑水河毛尔盖、拉萨河扎雪、象泉河阿青、三岔河引子渡等 10 多个水电站工程设计的关键问题研究中应用。现正在用于澜沧江如美、金沙江拉哇和雅鲁藏布江米林等超大水电站的设计研究中。该软件也曾应用于上海洋山港码头的研究和部分工程的地下水环境评价分析。



大渡河瀑布沟水电站

澜沧江如美水电站

图 1 典型的应用领域

2. 技术成熟度及应用案例

LinkFEA 软件的核心计算功能经过若干考题考核，在水利水电行业有近 20 年的应用，在水电站渗流控制、堆石坝结构设计和边坡稳定评价与边坡工程设计中，其计算分析成果，已经作为工程设计的依据，得到水电行业设计与审查部门的认可。依据工程分析的需要，软件的功能还在不断得到扩充。但软件本身在友好交互界面、建模和后处理功能上尚欠缺。软件作为产品出售，尚需要进一步开发完善。

应用案例：对大渡河长河坝水电站大坝和地下厂房的渗流场与渗流控制、大坝的应力变形和防渗结构安全，大坝初次蓄水时的坝体水力劈裂风险进行了系统的计算分析，所得计算结果用于指导大坝和地下厂房防渗体系的优化设计。

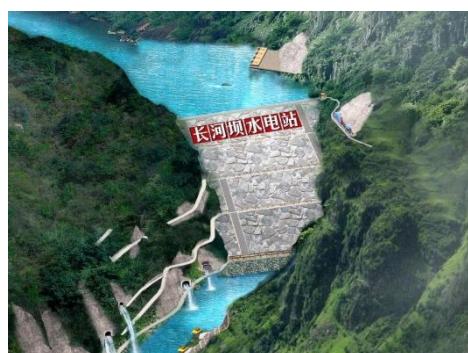


图 1 大渡河长河坝水电站

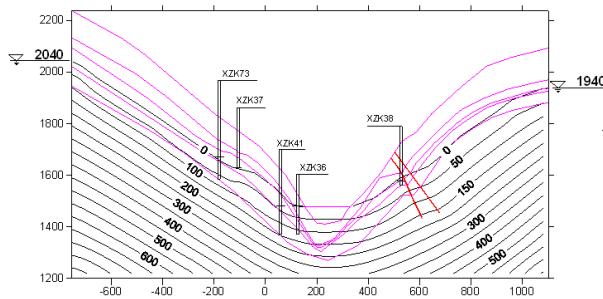


图 2 长河坝水电站河谷天然渗流场反演

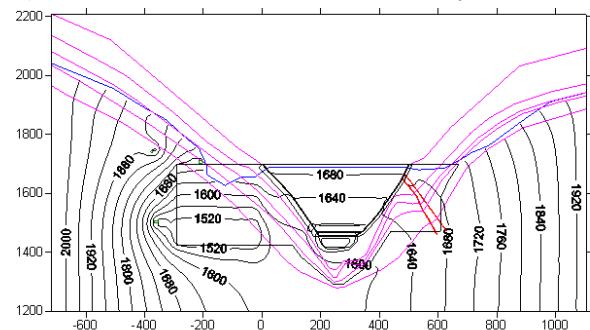
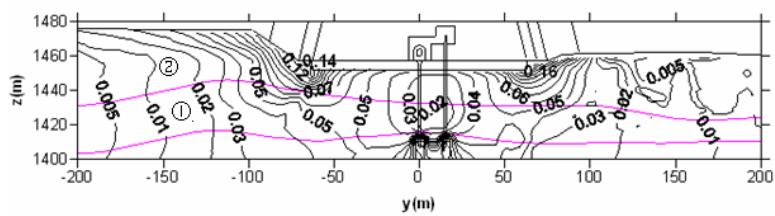


图 3 长河坝防渗平面的水头等值线 (m)



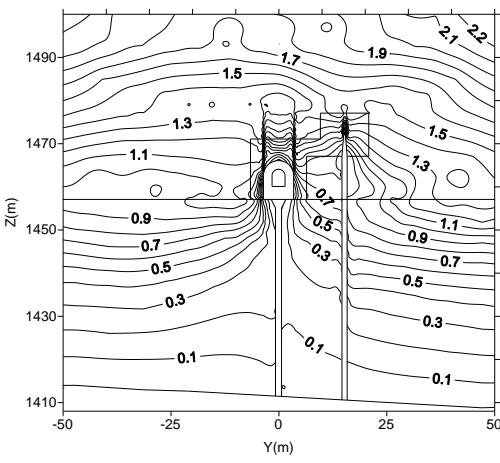


图 6 长河坝蓄水期河谷中心剖面防渗墙周边土体沉降 (m)

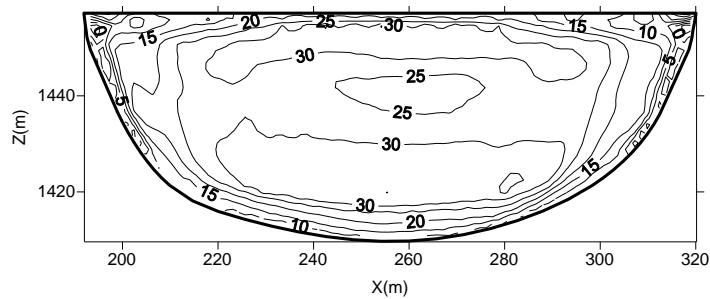


图 7 长河坝蓄水期主防渗墙上游侧主应力 (MPa)

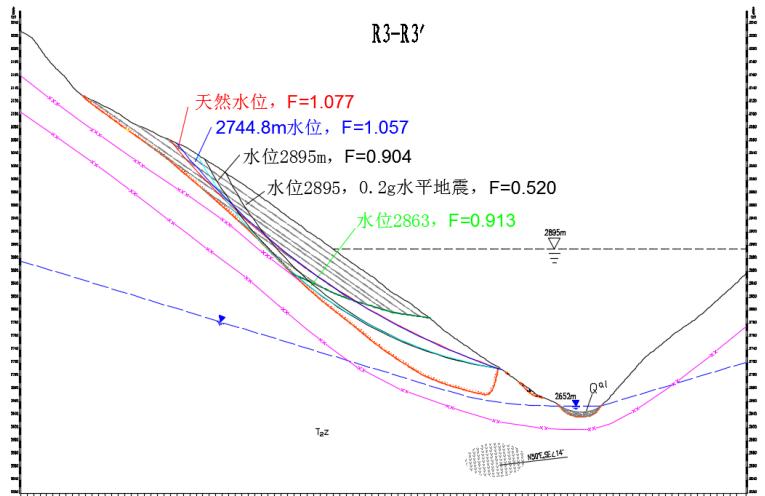


图 8 如美库区某堆积体各水位工况的圆弧滑动稳定安全性

3. 技术团队简介

软件由岩土力学与工程课题组吴梦喜高工 20 年的持续开发与应用发展而来。课题组其他人员主要参与了工程应用研究工作。

4. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	一种边坡的稳定性分析方法	ZL201510095093.5	吴梦喜，杨家修、艾永平、湛正刚、范福平、段兴林、李晓彬
2	一种砂砾石土管涌侵蚀过程中渗透系数动态变化模型	ZL201510295358.6	吴梦喜； 姜媛媛； 叶发明； 余挺； 张琦； 余学明； 王晓东
3	一种砂砾石土在管涌侵蚀中的本构关系描述方法	ZL201510303591.4	吴梦喜； 姜媛媛； 余挺； 叶发明； 张琦； 杨怀德； 王党在

地质灾害监测预警系统

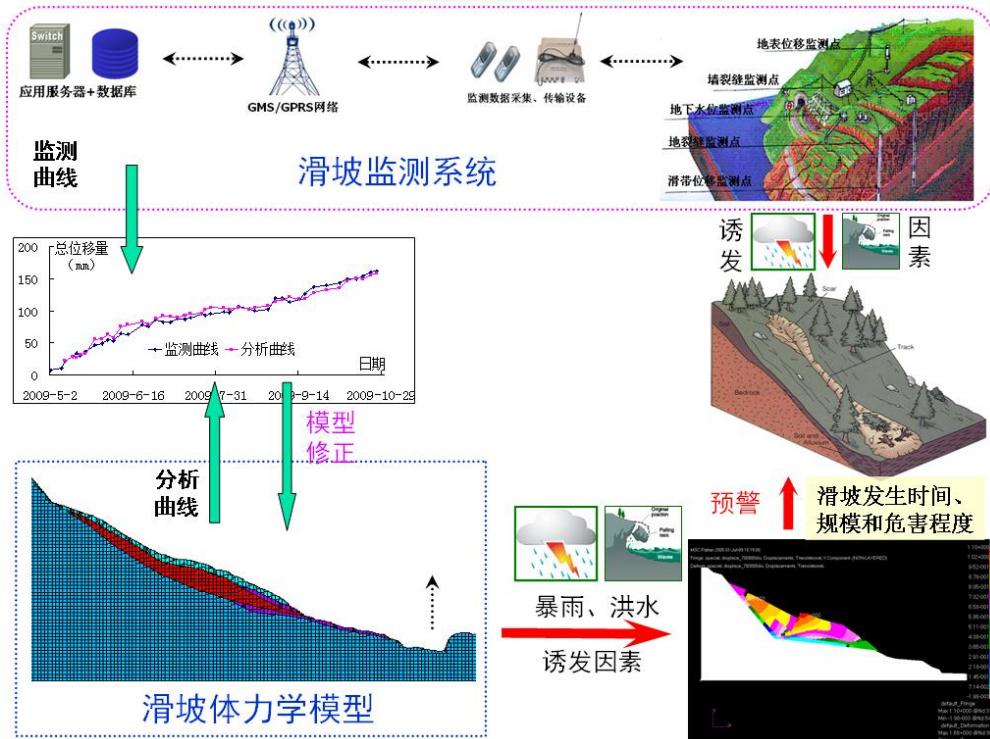
1. 技术介绍及特点

1) 工程需求

在我国经济高速发展过程中，大规模的基础设施建设和复杂恶劣的地质环境之间的矛盾日益突出，由此导致的滑坡、崩塌和泥石流等边坡地质灾害每年给国家和人民生命财产造成重大损失。大量的工程事故表明：采用经验判断、工程类比和简易分析等手段的传统边坡防治方法存在时效性差、准确性低等问题，已不适应边坡安全风险防控的要求。

2) 解决方案

为提高边坡安全风险防控的时效性和准确性，中科院围绕现场自动监测、实时在线分析和定期专家评判开展技术创新，经过多年技术攻关，研发了集智能监测设备、云计算分析平台和岩土专家服务为一体的边坡安全风险防控应用解决方案，可大幅度提高边坡病害早发现、早评判、早预警和早治理的水平。



地质灾害预警系统技术框架

3) 核心技术

➤ 现场数据采集

研发了以涡卷弹簧式位移计、深部岩土多物理量测量仪、结构空间形态测量仪为代表的现场自动化智能监测设备及无线数据传输设备，随时随地感知边坡所在场地的环境信息、监测对象自身的各种状态信息。

➤ 在线监测预警

以边坡智能在线监测预警云平台为基础，基于工程施工和服务流程构建了病害边坡的标准化工作方式，提供实时监测、报警通知、诊断预判等功能，同时，配备先进的力学分析模型、算法、工具及业主专属服务门户，高效地完成病害边坡的监测、预警及风险评估业务。

➤ 专家诊断预判

采用综合考虑边坡静态体质数据、动态体征数据与力学演化机理的 GMD 评估方法进行公路边坡预警分析，通过现场动态监测数据和数值模拟结果比对分析，建立边坡体观测物理量和其内部破坏状态之间的定量化联系，科学评判在线分析结果，预测边坡体在外动力因素变化条件下的发展趋势，进一步提高分析决策的精准性。

2. 应用领域

国土、交通、水利、能源、市政领域

3. 技术成熟度及应用案例

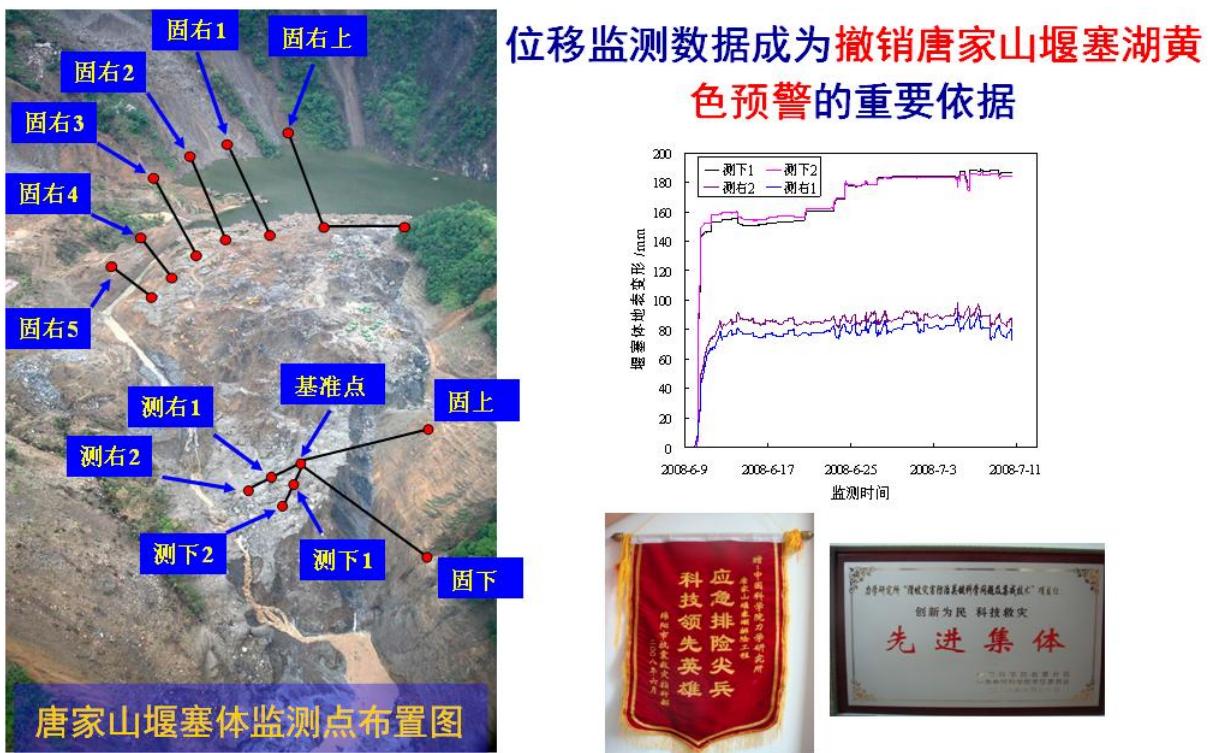
整套技术已具备推广应用价值。

➤ 应用案例——唐家山堰塞湖坝体变形应急监测预警工程（2008年）

工程概况：2008 年 5 月 12 日四川省汶川县发生 8.0 级地震，导致唐家山发生崩塌滑坡，堵塞河道形成堰塞湖。截止 6 月 8 日，唐家山堰塞湖坝前水位高程 741 米，水位高差近百米，蓄水量为 2.237 亿立方米。由于坝体为滑坡松散堆积体，唐家山堰塞湖存在全面溃坝的风险，直接威胁下游 130 余万人民生命财产安全。

测点布设：应唐家山堰塞湖抢险指挥部要求，力学所迅速搭建了四川省地质灾害预警系统，在堰塞体上安装了 16 套地表位移无线监测设备，在无人值守环境下实时监测堰塞体的整体位移及泄洪过程中堰体下游的坍塌变形。

预警分析：滑坡监测预警分析中心每半小时自动采集、实时无线传输的唐家山堰塞体的监测数据。所有监测数据经过整理后，以简报方式每小时给唐家山堰塞湖抢险指挥部上报一次，监测结果成为撤销唐家山堰塞湖黄色预警警报的关键依据之一。



➤ 应用案例——重庆三峡库区凉水井滑坡应急监测预警工程（2009年）

工程概况：三峡库区试验性蓄水至172米后，位于长江主航道上的重庆云阳凉水井滑坡于2008年11月开始出现变形，至2009年3月4日后，后缘拉裂缝已与侧边界裂缝贯通，侧边界裂缝已抵达江边。

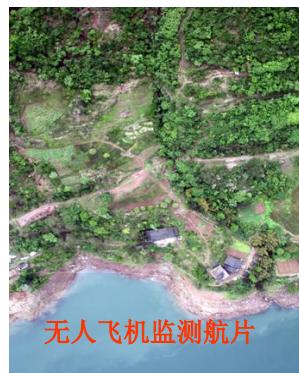
由于滑坡总体积约400万立方米，一旦滑入长江将可能造成5到10米高的涌浪，波及范围3公里至5公里，严重威胁长江主航道的安全，因此一度导致长江夜间封航，引起国务院高度重视，3位正副总理做出重点批示。

监测布置：为确保长江航道及当地居民安全，重庆市三峡地防办委托中国科学院力学研究所承担凉水井滑坡应急专业预警监测项目，全面采用自主研发的监测系统，建立全方位的立体监测网，对凉水井滑坡的地表、地下和边界裂缝变形进行实时、自动化监测。共安装25套地表位移测量设备、11套地表裂缝测量设备、7套深部位移设备、4套地下水位测量设备、1套雨量测量设备和1部群测群防信息终端设备。

预警分析：自2009年5月起，中科院力学所提供的实时监测数据和阶段分析成果证明凉水井滑坡目前未进入加速变形阶段，短期内凉水井滑坡没有整体失稳的危险。上述监测和研究工作，不仅确保了长江航道及当地居民安全，而且为治理工程决策提供了科学依据。

全方位立体监测网

- 1、地表位移监测（3个剖面上27个测点）
- 2、GPS变形监测（2个基准点、3个测点）
- 3、地表裂缝监测（4个测点）
- 4、深部位移监测（7个孔、21个测点）
- 5、雨量（1个）和地下水位监测（4个测点）
- 6、人工巡查（27个点）
- 7、无人机监测（30个地标）



无人机监测航片



地表位移监测设备



GPS监测设备



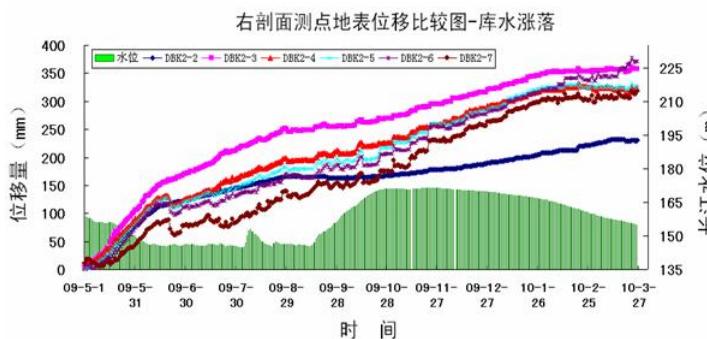
深部位移监测设备



地表裂缝监测设备



雨量监测设备



应用效益证明

三峡工程 175 米试验性蓄水后，我市云阳县凉水井滑坡出现明显变形，引起国务院、国土资源部、市委市政府和三峡指挥部等相关部门的高度重视。为确保长江航道及当地居民安全，市三峡办委托中国科学院力学研究所承担《云阳县松林镇凉水井滑坡应急专业预警监测》项目，采用由其自主研发的地表位移、深部位移、雨量和水位等监测设备，对凉水井滑坡的地表、地下和边界裂缝变形进行了实时、自动化监测，并开展滑坡体稳定性数值模拟分析。

自 2009 年 5 月起，中科院力学所提供的实时监测数据和阶段分析成果证明凉水井滑坡目前未进入加速变形阶段，短期内凉水井滑坡没有整体失稳的危险。

上述监测和研究工作，不仅确保了长江航道及当地居民安全，而且为下步政府防治决策提供了科学依据。



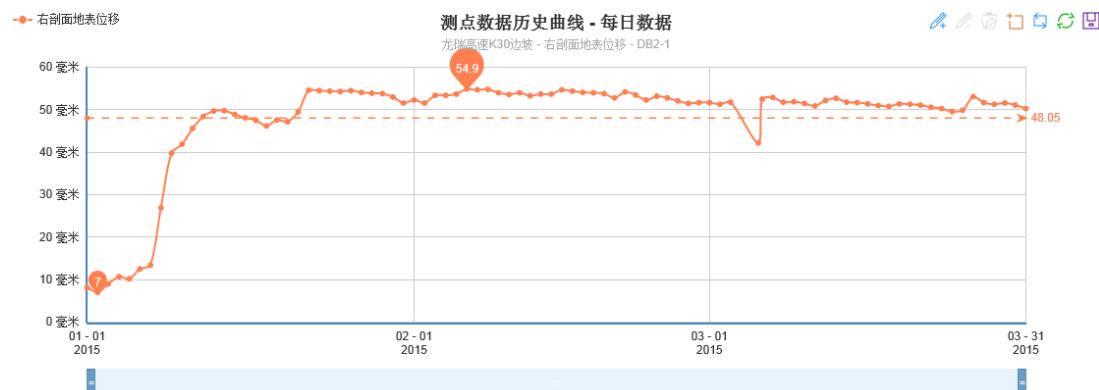
➤ 应用案例——云南高速边坡监测预警工程（2014 年）

工程概况：云南澜阿公路（普洱市澜沧至勐阿）是云南省干线公路网之一，是澜沧交通发展史上有史以来投资最多、架桥最多、工程量最大的一条公路。龙瑞高速公路（龙陵至瑞丽）主线全长 128.4 公里，是国家高速公路网杭州至瑞丽公路的重要组成部分，也是云南重点推进的“四出境”国际大通道之一。本项目共对澜阿公路边坡，龙瑞高速公路边坡开展自动化监测预警。

测点布置：共在澜阿公路、龙瑞高速公路布设 5 套涡卷弹簧式位移计、1 套深部岩土多物理量测量仪。

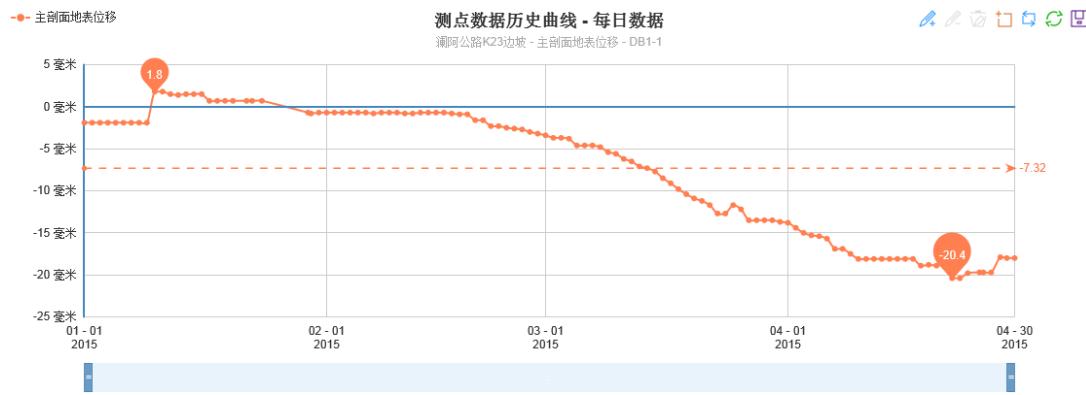
预警分析：（1）龙瑞高速公路边坡监测曲线显示该边坡在 2015 年 1 月 7 日至 13 日发生 40 多毫米地表位移，最大日变形速率超过 10 毫米。系统于 9 日发布红色预警，指挥部接到报警信息后，及时对隧道口实施加固方案。加固方案实施后，边坡变形逐渐趋于稳定；

(2) 澜阿公路边坡自 2015 年 2 月 19 日起，地表位移一直处于蠕滑变形状态，变形速率为每天 0.3 毫米。初步分析判定：该边坡目前稳定性为欠稳定状态；预警级别为警示级；风险级别为中风险，在强降雨条件下有加剧趋势。



龙瑞高隧道口边坡及其地表位移监测曲线





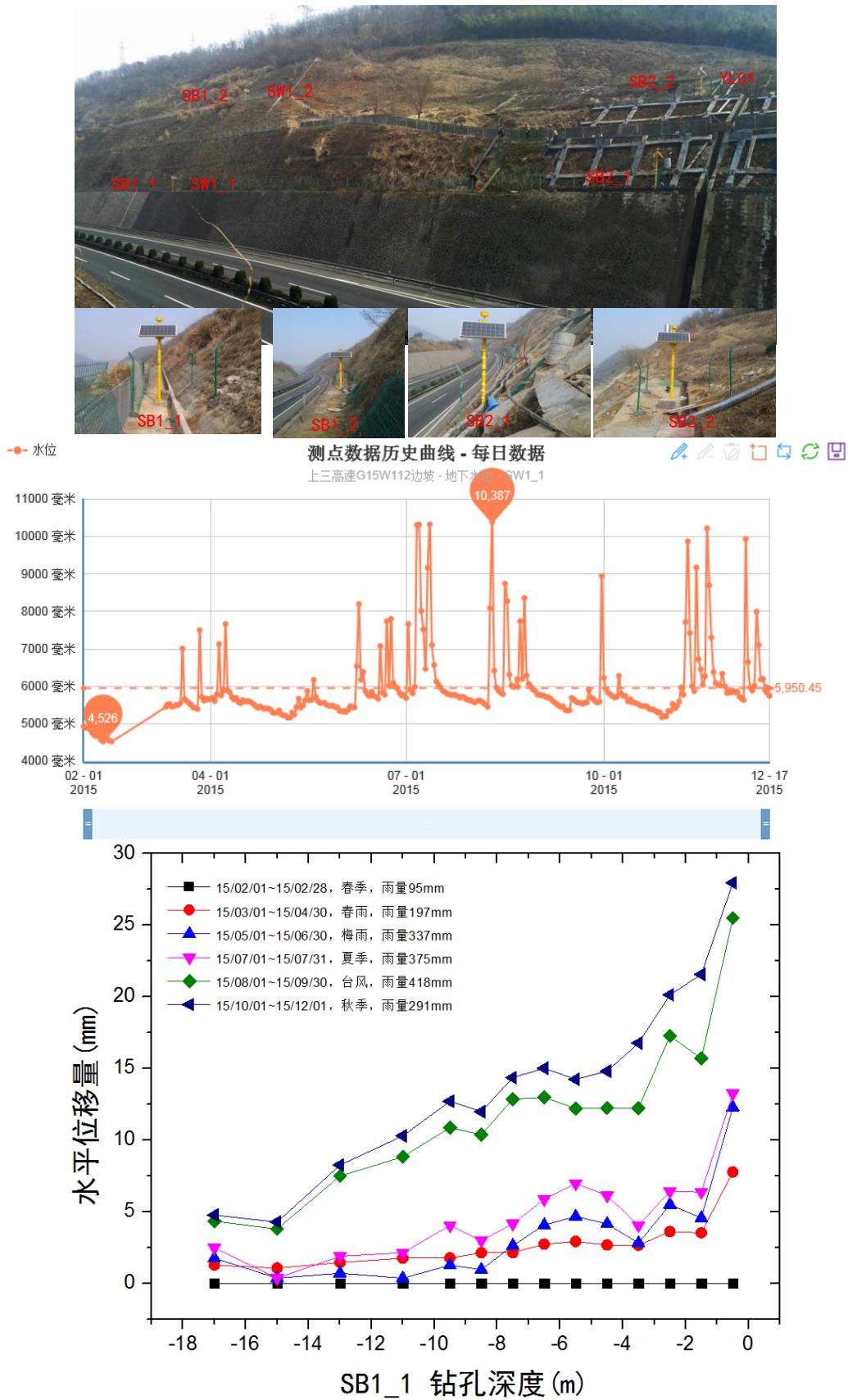
澜阿公路边坡及其地表位移监测曲线

➤ 应用案例——浙江高速边坡自动化监测预警工程

工程概况：该高速公路边坡位于浙江，属类土质边坡，坡高39.6m。线路切斜坡前缘通过，形成左侧路堑边坡。地表水丰富。地下水发育，主要为基岩裂隙水和松散岩类孔隙潜水。2000年该边坡坡顶土层曾发生滑塌；2009年受台风“莫拉克”影响，边坡坡体出现土层坍塌滑落；2013年风险级别评定为II-B类，实施防护加固措施。

测点布置：根据该边坡变形区的特点，在该边坡监测范围设置两条监测测线——剖面I和剖面II，采用雨量计、深部岩土多物理量测量仪，布设1个雨量监测点、2个地下水位监测点、4个深部位移监测孔（共计66个测点），构成二横二纵监测网。同时，在桩号里程某位置处的浆砌挡墙伸缩缝两侧各布设一条监测测线，采用三维空间变形测量仪，布设15个测点，开展连接缝两侧挡墙倾斜变形对比监测。

预警分析：（1）边坡为牵引式滑坡，整体处于匀速变形的蠕滑阶段，变形速率为每月毫米量级；（2）降雨是诱发边坡蠕滑变形的主导因素，坡体内部存在多个变形区。坡脚主滑面已形成，坡体中部主滑面处于形成过程中，滑动面尚未完全贯通整个边坡；（3）预警级别为注意级别，风险性级别为中风险等级，短期内发生地质灾害的可能性不大，但在强降雨条件下，未来发生地质灾害的风险性将增大。



边坡监测布置及水位、深部位移监测曲线

4. 技术团队简介

中科院重要方向性项目课题组：

- 山体滑坡防治中的关键力学问题研究；
 - 滑坡灾害防治关键科学问题及集成技术研究；
 - 汶川地震次生地质灾害监测预警与决策支持系统；
- 主要成员：李世海、刘晓宇、冯春、赵颖、范永波、刘天苹

5. 知识产权情况

序号	专利名称	专利号	专利完成人
1	测量滑坡滑动面位置与滑动量的方法及其装置	ZL2005101322056	孟祥跃、李世海、刘晓宇
2	一种坡体表面位移测量方法和装置	ZL2005100596241	孟祥跃、李世海
3	一种地表裂缝的三维测量方法及测量装置	ZL2011100089562	李世海、刘晓宇、侯岳峰
4	一种测量滑坡表面倾斜及滑坡主滑方向的方法和装置	ZL201210461608.5	侯岳峰、李世海、刘晓宇
5	一种用于滑坡物模实验平台的库水位涨落方法和装置	ZL201310112486.3	范永波、侯岳峰、李世海