

2019 年度浙江省技术发明奖提名公示表

一、成果名称

高质高效激光表面改性技术及其工业应用

二、提各单位及提名意见

提各单位	浙江省教育厅
提名意见（限 600 字）	
<p>该项目针对现有激光表面改性技术质量控制难、效率低及传统表面改性高能耗高污染的行业共性问题，提出了基于恒稳电-磁场和超音速动能场复合的高质高效激光表面改性原理，并开发了相应的专用装备及工艺，首次实现了以金刚石作为增强颗粒的高硬度金属基复合材料的高效率微锻态激光沉积，获得形性可控且 100% 致密的激光熔覆层，在能源动力、石油化工、精密模具等高端装备中实现了产业化应用。主要创新有：（1）发明了超音速激光沉积技术，突破了单一激光改性的材料限制，大幅提高了表面改性效率，实现了汽轮机转子、化工阀门、工模具复杂表面的大面积高质高效改性；（2）发明了恒稳电-磁场协同激光改性技术，突破了单一激光改性工艺调整的极限，实现大型转子和长叶片的深层表面改性；（3）发明了基于能量场复合改性关键单元及可移动式装备，实现了快速响应的现场改性，降低了超大型部件表面改性的成本和转运带来的风险，避免了大量停机损失。</p> <p>项目已获授权专利 27 项。近三年累计新增销售额 12.02 亿元，新增税收 1.59 亿元，新增利润 4.25 亿元，另获间接经济效益 8.54 亿元，保障了重大装备的安全性、可靠性，有效替代了高能耗、高污染、低效率的传统生产工艺，实现了昂贵关键部件的国产化制造，对我省乃至国内高端装备制造行业的技术进步和产业结构升级起到显著的推动作用。</p> <p>提名该成果为省技术发明奖一等奖。</p>	

三、成果简介

主要技术内容、授权知识产权情况、技术指标、应用推广及取得的经济社会效益等（限1000字）

工业关键核心部件技术要求高，制造难度大。而80%以上的工业核心部件的失效源于表面磨损、腐蚀或氧化，造成巨大损失。表面改性技术是提升其寿命的关键。传统表面热处理、化学处理、涂装等技术，由于环境污染、能耗过高及性能不高等问题，已不能满足核心部件制造要求。激光表面改性技术被公认为是最具潜力的新一代绿色高效的表面改性技术之一。然而，由于高能密度激光与工件的作用时间非常短，存在热输入量大、冶金缺陷控制难、强化层深度有限、成本高、设备通用性差等共性难题，限制了该技术的大范围推广应用。本项目发明了动能场、电磁场等能场与激光场同步复合的方法，研发了多能场复合激光表面改性技术及系列化装备，突破了上述技术瓶颈，并实现了产业化应用。主要创新包括：

(1) 针对激光表面改性存在的效率低和冶金相变过程难以控制问题，提出了超音速粒子动能场与激光同步耦合沉积原理，发明了超音速激光沉积技术，沉积效率为传统激光熔覆技术的10倍，实现了大面积高效改性，突破了单一激光表面改性的材料限制，首次实现了金刚石/Ni60、WC/Cu、WC/Stellite 6等热敏感、高硬度以及颗粒增强复合材料的微锻态沉积。

(2) 针对激光熔覆中容易残留气孔、表面形貌及内部质量难以控制等问题，首次提出了电磁场耦合形成的定向洛伦兹力调控熔池流体传质传热的原理，发明了恒稳电-磁场协同激光表面改性技术，突破了单一激光改性工艺调整的极限，实现了熔池的主动排气、形貌控制、增强颗粒分布调控、组织调控以及窄隙部位的高密度充型。

(3) 基于能场复合激光表面改性创新原理，发明了电-磁复合场同步耦合、超音速粒子复合激光同轴喷嘴和同步感应加热等多个能场复合改性关键单元，研制了响应快速、改性效率高、可模块化装运和灵活移动的复合表面改性专用装置，集成了成套装备。

经第三方检测和用户使用表明，采用本项目技术获得了热影响区 $\leq 9\mu\text{m}$ 、硬度达HV1300、无开裂的改性层；用于汽轮机大型转子和铸铁缸体的表面改性，致密度达100%；用于长1000mm以上叶片的表面改性，其强化深度可达4mm以上，打破国外垄断；用于化工装备用阀门表面的防腐耐磨改性，全面替代电镀。由中国机械工程学会组织的鉴定会认为：“该项目创新性强，整体技术达到国际先进水平，其中熔覆沉积层形性调控技术达到国际领先水平”。本项目已发表论文130篇，其中SCI、EI收录论文41篇，出版专著2部，获国家标准1项，授权专利27项，其中美国发明专利1项、中国发明专利22项。

该技术已大量应用于能源动力、石油化工等行业的转子、叶片、高端阀门等工业核心部件制造中，累计处理零部件 55 万余件。相关产品覆盖我国除西藏之外省市的 200 多家企业，应用于高性能舰船驱动单元、“神华宁煤十万空分装置”、“国电库尔勒项目”等百余项国家重大工程，近三年累计新增销售额 12.02 亿元，新增税收 1.59 亿元，新增利润 4.25 亿元，另获间接经济效益 8.54 亿元，有效替代了高能耗、高污染、低效率的生产工艺，推动了我省先进制造业的技术进步，为保障高端装备的安全可靠性、实现国产化制造做出了重大贡献。

四、第三方评价

评价结论、检测结果等（限 1200 字）

1. 鉴定会评价

“复合能场激光熔覆制造关键技术及其应用”项目于 2018 年 1 月通过了由中国机械工程学会组织的成果鉴定。以谭建荣院士、宋天虎监事长、单忠德院士等专家组成的鉴定委员会认为：“该项目创新性强，整体技术达到国际先进水平，其中熔覆沉积层形性调控技术达到国际领先水平。”

2. 同行专家对学术水平的评价

(1) 英国皇家工程院院士 Lin Li 教授评价认为：“在磁场辅助激光加工和超音速激光沉积超硬涂层方面的工作具有开创性。(2) 乌克兰国家工程院院士、副院长 Volodymyr Kovalenko 教授评价认为：“您团队在激光复合制造技术研究及其工业应用方面取得了显著的成就，特别是首次采用超音速激光沉积制备超硬涂层，达到世界先进水平”。(3) 国际光子学与激光工程学会主席、美国激光学会主席 Yongfeng Lu 教授评价认为：“您团队在超音速激光沉积技术方面具有杰出成就，并开辟了一种新型的激光复合制造技术”。

3. 国际查新报告

浙江省科技信息研究院科技查新中心的查新结论如下：开发的动能场复合超音速激光沉积技术；电磁场复合激光制造控形控性技术，工艺参数自整定闭环控制系统和基于神经网络的工艺专家系统等技术，除项目组自身发表的文献有部分报道外，未见其他文献述及。

4. 检测机构评价

通过具备 CAL、CMA、CNAS 资质的第三方机构检测表明：超音速激光沉积试样平均硬度 HV1351，平均热影响区 8.3 μ m，沉积效率 270g/min；多能量场复合激光强化试样硬化层深度达 4.2mm，硬度 HV402-481，致密度 100%；送粉精度误差在 1% 以内，温控精度 0.5% 以内。

5. 代表性用户评价

(1) 应用于百万千瓦等级的大型核电及火电汽轮机组用叶片、转子及气缸等。上海电气电站设备有限公司和哈尔滨汽轮机厂有限责任公司认为：“只需 2~3 层熔覆层即可达到设计与使用要求，可节约大量材料、提高效率和质量；利用该技术制造的叶片，其硬化层深度达 4 mm 以上，变形极小，无需矫形处理；已应用于阳江核电百万千瓦超超临界机组、泰州二次再热超超临界机组等多项国家重大工程的节能机组”。已累计处理各种型号汽轮机部件 30000 多件，装机 199 台套，运行状态安全稳定。(2) 应用于石化行业重大装备的腐蚀失效的轴、压缩机螺杆及阀门等关键部件改性与再制造。浙江巨化装备制造有限公司认为：成功应用于晋巨水煤浆汽化炉等重要关键零部件的修复与强化共计 870 余件，节支 1 亿元以上。

6. 政府部门及新闻评价

科技部网站报道：“国际上首次提出将超音速冷喷涂沉积与激光技术相结合实现金属 3D 打印的观点，打破现有技术瓶颈，实现高效率、高品质、低成本智能化制造，为浙江乃至全国制造业转型升级提供技术支撑”。浙江日报以《浙工大：紧密对接企业需求》报道项目组用先进的新一代激光制造技术改造了传统方式，把实验室成果转化为现实生产力，用科研创新驱动强力助推浙江经济转型升级。

7. 《10000 个科学难题》收录

项目主要技术“超音速激光沉积技术”、“电磁场复合激光熔覆”等，被《10000 个科学难题 制造科学卷》（科学出版社，2017）收录。

五、推广应用情况、经济效益和社会效益

1. 完成单位应用情况和直接经济效益

单位名称	新增应用量			新增销售收入(单位:万元)			新增税收(单位:万元)			新增利润(单位:万元)		
	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年
杭州汽轮机股份有限公司	90	119	127	5940.00	7854.00	8382.00	325.90	203.16	705.12	4375.13	5688.16	6291.30
杭州博华激光技术有限公司	78500	83100	90600	426.78	453.11	487.65	74.67	82.21	120.44	57.67	99.18	137.88
合计	78590	83219	90727	6366.78	8307.11	8869.65	400.57	285.37	825.56	4432.8	5787.34	6429.18
	252536			23543.54			1511.5			16649.32		

2. 推广应用情况和经济效益（非完成单位）

应用单位名称	起止时间	单位联系人、电话	新增应用量			新增销售收入(万元)			新增税收(万元)			新增利润(万元)		
			2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年	2016年	2017年	2018年
上海电气电站设备有限公司	2012-2018	沈红卫, 021-64358331*3388	9	7	11	14040	10920	17160	2358	1857	2916	3930	3057	4806
哈尔滨汽轮机厂有限责任公司	2014-2018	刘新新, 0451-82952997	23	34	22	8478	12566	8110	746	1106	713	1959	2904	1874
杭州中能汽轮动力有限公司	2012-2018	李锡明, 0571-86751398	143	132	148	7156	5998	6451	1252	1050	1129	2075	1739	1871
无锡阳工机械制造有限公司	2012-2018	杨龙兴, 13506171435	116	130	135	1750	1952	2035	389	429	452	526	566	590
浙江巨化装备制造有限公司	2012-2018	曹彬, 0570-3612910	248	285	337	/	/	/	/	/	/	/	/	/
浙江华元汽轮机械有限公司	2012-2018	胡志斌, 13646852582	11	8	11	/	/	/	/	/	/	/	/	/
合 计:			550	596	664	31424	31436	33756	4745	4442	5210	8490	8266	9141
			1810			96616			14397			25897		

3.社会效益和间接经济效益（限 600 字）

社会效益：

- (1) 突破了现有单一激光表面改性技术质量和效率的瓶颈，在能源动力装备、石化装备、工模具等多行业中实现产业化应用，形成一批示范性应用工程，推动先进制造技术的发展和产业优化升级。
- (2) 替代了传统电镀、火焰淬火、感应淬火等高能耗、高污染工艺，减少用于废弃零部件回炉冶炼的能源消耗，显著减少大气污染，减少电镀产生的工业废水。
- (3) 实现了高附加值零部件的新品强化和报废零部件的高性能修复，有效提升了产品质量，变废为宝，为可持续发展和建设节约型社会提供了关键技术支持。
- (4) 培养了一批高层次专业人才，为学科发展提供了全新的具有普适性的表面处理与增材制造新方法。

间接经济效益：

本项目研究对象如汽轮机机组叶片、转子、阀门、关键轴等关键部件经高质高效激光表面改性技术处理后，由于产品性能提升，给用户单位带来提高设备运行效率、减少停机损失、延长大修期、节省制造成本、打破国外技术垄断等应用效果。经部分应用单位统计，近三年本项目技术产生间接经济效益 8.54 亿元。

六、主要知识产权证明目录

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	权利人	发明人(培育人)
发明专利	Metal-Based/Diamond Laser Composite Coating and Preparation Method Thereof	美国	US9945034B2	2018.04.17	浙江工业大学, 杭州博华激光技术有限公司	姚建华, 李波, 陈智君, 张群莉, 胡晓冬, 董刚, 吴国龙, 王梁, 弗拉基米尔.科瓦连柯
发明专利	一种金属基/金刚石激光复合涂层及其制备方法	中国	ZL201410277492.9	2017.07.28	浙江工业大学, 杭州博华激光技术有限公司	姚建华, 李波, 陈智君, 张群莉, 胡晓冬, 董刚, 吴国龙, 王梁, 弗拉基米尔.科瓦连柯
发明专利	一种电-磁复合场协同激光熔覆的方法及装置	中国	ZL201410392196.3	2017.02.15	浙江工业大学	姚建华, 王梁, 胡勇
发明专利	静态磁场-激光同轴复合熔覆方法及装置	中国	ZL201310755461.5	2017.02.22	杭州博华激光技术有限公司	姚建华, 王梁, 张群莉, 陈智君
发明专利	在硬基板上通过激光辅助冷喷涂获得硬质颗粒涂层的方法	中国	ZL201310307606.5	2016.01.06	浙江工业大学, 杭州博华激光技术有限公司	姚建华, 孔凡志, 陈智君, 董刚, 张群莉, 胡晓冬
发明专利	一种激光辅助冷喷涂方法及喷嘴装置	中国	ZL201410101590.7	2016.08.24	浙江工业大学, 杭州博华激光技术有限公司	姚建华, 弗拉基米尔.科瓦连柯, 张建锋, 陈智君
发明专利	一种窗形逸气式宽带送粉喷嘴	中国	ZL201610323481.9	2018.05.08	浙江工业大学, 杭州汽轮机股份有限公司	胡晓冬, 姚建华, 陈智君, 王云生, 骆芳, 叶钟, 阿里亚肯.迈克勒, 如斯勒.褚克
发明专利	一种用于螺杆激光组合制造的工艺方法	中国	ZL201410833363.3	2017.03.08	浙江工业大学, 杭州博华激光技术有限公司	姚建华, 董刚
发明专利	一种用于热作模具激光组合制造专用粉末及其制造工艺	中国	ZL201410325212.7	2016.04.13	杭州博华激光技术有限公司	姚建华, 楼程华, 张群莉, 陈智君
发明专利	一种汽轮机钛合金叶片的激光强化方法	中国	ZL201110265154.X	2013.07.24	浙江工业大学, 杭州博华激光技术有限公司	姚建华, 楼程华

七、主要完成人员情况

排名	姓名	行政职务	技术职称	现从事专业	工作单位	二级单位	完成单位	对本成果主要技术发明的创造性贡献
1	姚建华	院长	教授	机械工程	浙江工业大学	机械工程学院	浙江工业大学	总体方案设计
2	王梁	副院长	高级工程师	机械工程	浙江工业大学	激光先进制造研究院	浙江工业大学	电磁场复合技术研发
3	张群莉	副院长	副教授	材料工程	浙江工业大学	激光先进制造研究院	浙江工业大学	复合工艺开发
4	董刚	无	讲师	材料工程	浙江工业大学	激光先进制造研究院	浙江工业大学	专用材料设计及制备
5	李波	无	讲师	机械工程	浙江工业大学	激光先进制造研究院	浙江工业大学	动能场复合工艺开发
6	叶钟	总经理	教授级高工	机械工程	杭州汽轮机股份有限公司	无	杭州汽轮机股份有限公司	汽轮机部件应用

八、主要完成单位情况表

排名	单位名称	对本成果主要技术发明和推广应用的支撑作用情况（限 300 字）
1	浙江工业大学	发明了超音速激光沉积技术和恒稳电-磁场协同激光改性技术，提出了基于超音速动能场和恒稳电-磁场复合的高质高效激光表面改性原理，并开发了相应的专用装备及工艺，首次实现了以金刚石作为增强颗粒的高硬度金属基复合材料的高效率微锻态激光沉积，获得形性可控且 100% 致密的激光熔覆层。利用上述技术成果，在能源动力装备、石油化工以及医疗、工模具等工业基础件中推广应用。
2	杭州汽轮机股份有限公司	长期与浙江工业大学合作，围绕工业汽轮机关键部件的制造难题，联合开发了系列先进制造技术，尤其是 2012 年以来，双方合作研发了高质高效激光表面改性技术，对叶片、转子、阀杆、飞锤等关键部件进行了新品制造和旧品修复，获得了标准的工艺准则和材料，用于提高叶片的抗水蚀和转子的耐磨性能。利用项目成果成功应用于“国电江苏泰州电厂”、“国电宁波北仑

		电厂”、“华能广东海门电厂”等重大工程的百万千瓦机组给水泵汽轮机和其他工业汽轮机组；应用于“中海油富岛”、“上海金山石化”等重大项目的 GBT-501、TK101 等型号大型转子轴的现场激光再制造修复。
3	杭州博华激光技术有限公司	<p>作为浙江工业大学激光先进制造研究院的产业化基地，主要承担了项目研究成果的转化及产业化任务，完成了基地固定式和现场移动式两大类激光表面改性成套装备的研制开发，建立了能场复合激光表面改性生产线；完成了汽轮机叶片、转子、医疗基础件、工模具以及阀门等的激光表面改性处理。处理各类型号叶片 30 万余件，转子 50 余件，医用口腔正畸钳 23 万余件，工模具 2 万余件，有效提高了关键工业基础件的制造效率，替代了传统高污染落后产能，产生显著的社会经济效益。</p>

九、完成人合作关系说明（含情况汇总表）

本项目“高质高效激光表面改性技术及其工业应用”由浙江工业大学、杭州汽轮机股份有限公司以及杭州博华激光技术有限公司共同合作完成。

浙江工业大学与杭州汽轮机股份有限公司、杭州博华激光技术有限公司开展长期合作，共同针对能源动力、石油化工、医疗器械、工模具等行业关键部件的先进激光表面改性技术开展联合攻关，浙江工业大学联合杭州汽轮机股份有限公司共同承担了 NSFC-浙江两化融合联合基金、“汽轮机系列动叶片激光强化技术的开发”、“汽轮机叶片激光表面改性技术的开发”等合作项目的研发；浙江工业大学与杭州博华激光技术有限公司共同完成了“汽轮机系列叶片激光强化与熔覆技术的开发”、“金属叶片激光强化工艺用合金吸光涂料及其激光强化工艺/一种汽轮机抗气蚀叶片及其成形方法”等项目的研发任务。浙江工业大学研究人员为项目技术创新方面的核心人员，提出了动能场复合激光、电磁场复合激光等表面改性新原理，开发了超音速激光沉积、电磁场复合激光等新型表面改性技术。杭州汽轮机股份有限公司、杭州博华激光技术有限公司团队分别负责项目技术在能源动力、石油化工以及工业基础件等领域的推广研究。该项目的研究成果已通过成果鉴定。

自项目实施以来，完成人共同承担研究任务、联合发表学术论文、申请专利等形式，开展了高效高质激光表面改性及其工业应用的合作研究。本项目完成人姚建华、张群莉、王梁、董刚、李波都来自浙江工业大学，姚建华是本项目负责人，全面负责项目的各项进展工作和总体技术方案设计；张群莉、王梁、李波共同负责工艺开发及优化；董刚负责改性专用材料的设计及制备；项目完成人叶钟来自于杭州汽轮机股份有限公司，主要负责项目技术在能源动力装备关键零部件（如叶片、转子）表面改性方面的应用。

承诺：本人作为成果第一完成人，对本成果完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。

第一完成人签名：



完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者	合作时间	合作成果	证明材料编号	备注
1	共同知识产权	姚建华, 李波, 张群莉, 董刚, 王梁	2014.06-至今	美国发明专利: Metal-based/diamond laser composite coating and preparation method thereof	8-1	
2	共同知识产权	姚建华, 李波, 张群莉, 董刚, 王梁	2014.07-至今	中国发明专利: 一种金属基/金刚石激光复合涂层及其制备方法	8-2	
3	共同知识产权	姚建华, 王梁	2014.07-至今	中国发明专利: 一种电-磁复合场协同激光熔覆的方法及装置	8-3	
4	共同知识产权	姚建华, 王梁, 张群莉	2013.12-至今	中国发明专利: 静态磁场-激光同轴复合熔覆方法及装置	8-4	
5	共同知识产权	姚建华, 董刚, 张群莉	2013.07-至今	中国发明专利: 在硬基板上通过激光辅助冷喷涂获得硬质颗粒涂层的方法	8-5	
6	共同知识产权	姚建华, 叶钟	2010.01-至今	中国发明专利: 一种窗形逸气式宽带送粉喷嘴	8-6	
7	共同知识产权	姚建华, 张群莉	2010.01-至今	中国发明专利: 一种用于热作模具激光组合制造专用粉末及其制造工艺	8-7	
8	共同知识产权	姚建华, 董刚	2012.04-至今	中国发明专利: 一种用于螺杆激光组合制造的工艺方法	8-8	