

一、项目名称

陶瓷刀具的高性能设计理论与主动调控制备技术

二、申报奖种

技术发明奖

三、推荐单位

山东大学

四、项目简介

智能制造系统的核心共性关键技术是成形技术，而高速切削磨削加工在机械零部件及产品的最终成形技术中约占 70%。可见，仅有智能是无法实现智能制造，高速切削加工仍是实现零部件成形所必须的技术。刀具是高速切削加工的牙齿，其在高速切削加工中占有重要地位，但是目前我国刀具技术发展缓慢，已成为制约我国高端制造业发展与安全的瓶颈。陶瓷是继高速钢、硬质合金、涂层刀具之后的一种高硬度刀具材料。在工业发达国家陶瓷刀具通常占其刀具使用总量的 10~15%，尤其在汽车制造业中使用比例更大，例如，美国福特公司陶瓷刀具用量占到 40%。我国国产陶瓷刀具占国内刀具使用总量不足 1%，主要应用于其它刀具难以胜任的难加工材料加工领域。目前，我国刀具产品存在质量难上档次，门类严重“偏科”等现象，高端陶瓷刀具产品尤为少，其根源在于我国陶瓷刀具研究普遍存在重试验、轻理论设计的现象。

项目组在教育部长江学者奖励计划、国家杰出青年科学基金和科技重大专项的支持下，围绕陶瓷刀具高性能设计理论及其主动调控制备技术，提出了独特的陶瓷刀具设计新理论，发明了全新的陶瓷刀具制备技术，首创了六类增韧补强陶瓷刀具，在难加工零件高效加工中实现了规模化应用。主要技术发明包括：1) 首创了陶瓷刀具增韧补强设计理论与模拟方法。提出了基于高温力学性能演变和切削可靠性的陶瓷刀具高性能设计理论；创建了陶瓷刀具微观组织演变、制备工艺预知、力学性能预测、切削可靠性预报的模拟方法。2) 创建了陶瓷刀具组分

原位生成与陶瓷刀片坯体烧结一体化制备及其组分元素扩散与主动调控技术。发明了陶瓷刀具组分原位化学合成与陶瓷刀片坯体热压成形成性一体化主动调控制备技术，取代了传统陶瓷刀具制备方法；阐明了刀具制备过程中组分元素扩散机制及其微观结构缺陷的主动调控机制。3) 研制了多种高性能新型陶瓷刀具系列。发明了自增韧 Si_3N_4 基纳米复合刀具、晶须原位增韧 Al_2O_3 复合刀具、 TiB_2 棒晶原位增韧复合刀具、金属陶瓷刀具、金属陶瓷微铣刀、自扩散微叠层复合刀具等。适宜于高速切削加工铸铁、不锈钢和模具钢，与京瓷、山特维克、戴杰等国际知名品牌陶瓷刀具对比，刀具寿命平均提高 1-3 倍，表面粗糙度值平均降低 1.5-3 倍，加工效率提高 1-3 倍，成本降低 1/4-1/3。

成果应用于能源和汽车制造领域骨干企业，近三年直接经济效益新增销售 10260 万元，新增利润 616 万元，新增税收 584 万元。项目获授权国家发明专利 21 项、软件著作权 10 项；发表学术论文 109 篇，SCI 他引 1000 次。经同行专家鉴定认为：“该项目创新性强，整体技术达到国际先进水平，其中原位生成与坯体一体化制备调控技术达到了国际领先水平”。

该项目成果潜在社会和经济效益显著，显著推动我国陶瓷刀具及其应用行业自主创新技术的进步。打破了国外发达国家在高端陶瓷刀具领域对我国的技术封锁，提升了我国陶瓷刀具设计理论与方法、制备技术与应用水平，有力支撑了我国国产陶瓷刀具的理论创新和批量化生产，为提高数控机床能效提供了刀具支撑。

五、推广应用情况

该项目成果在山东日新复合材料有限公司、中国重汽集团济南动力有限公司、山东省章丘鼓风机股份有限公司、日照海卓液压有限公司等企业得到推广应用，具体情况如下：

山东日新复合材料有限公司自 2014 年起一直与山东大学合作开展“陶瓷刀具材料的设计、制备与应用技术”产学研工作，成功地将陶瓷刀具材料的增韧补

强设计与制备理论成果量产为工业用陶瓷刀片，开发了一系列具有自主知识产权的高性能陶瓷刀具与批量制备工艺技术，形成了具有国际竞争力的陶瓷刀具产品，其产品质量、生产效率、稳定性等关键指标均达到了国际同类产品水平，填补了我国高性能陶瓷刀具产业化领域制备工艺与方法的技术空白，显著提升了我国陶瓷刀具的国际竞争力（附件 17）。开发的系列陶瓷刀具技术指标及规范如下：

[1] 自增韧 Si_3N_4 ：含 $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ 和纳米 $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_{4w}$ ，烧结温度 1650~1750 $^\circ\text{C}$ 、保温 40min 和保压 30MPa，抗弯强度 1300 MPa、断裂韧度 $9.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、维氏硬度 18.0 GPa；
[2] 原位 TiC 晶须增韧 Al_2O_3 ：含 Al_2O_3 和 TiC 晶须，晶须借助触媒液滴相 Ni 和传质相 NaCl 的碳热还原反应获得，二步保温制备（1480 $^\circ\text{C}$ 保温 60min，再 1700 $^\circ\text{C}$ 保温 30min），抗弯强度 900MPa、断裂韧度 $9.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、维氏硬度 21.0 GPa；
[3] TiB_2 棒晶增韧 TiB_2 ：含 TiB_2 和 TiB_2 棒晶，属热爆加压原位一体化制备，烧结温度 1750 $^\circ\text{C}$ 、保温 60min、保压 35MPa，抗弯强度 1121MPa、断裂初度 $7.9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、维氏硬度 23.3GPa；
[4] 低缺陷金属陶瓷：含 $\text{Ti}(\text{C}_7\text{N}_3)$ 、Ni、Co 和 TaC 等，烧结温度 1450 $^\circ\text{C}$ 、保温时间 30~45 min、烧结压力 28~32 MPa，抗弯强度 2150 MPa、断裂韧度 $8.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、维氏硬度 20.8 GPa。

中国重汽集团济南动力有限公司承担着中国重汽各类型号发动机及零部件的研发和生产等任务。随着重型卡车排放标准和机动性能的提高，发动机零件部件材料不断更新（粉末铸铁、蠕墨铸铁等），一方面使发动机使役性能越来越优越，另一方面也增加了相关零部件切削加工的难度，体现在刀具成本提高、切削效率降低、零件加工质量不易保证，急需技术创新改革、提高加工效率和质量、降低加工成本。本公司近十年来一直与山东大学合作开展“高速切削加工及陶瓷刀具的推广应用技术”产学研工作，成功地将新型陶瓷刀具应用到了中国重汽发动机切削加工生产线上，部分替代了硬质合金刀具，满足了汽车发动机生产线快节奏加工要求（附件 18），典型案例如下：[1] 在 D12 缸体总成镗孔中加工线速度由 518m/min 提高到 979m/min，材料去除率由 41.4 cm^3/min 提高到

70.5cm³/min，表面粗糙度达到 Ra1.6 要求，刀具寿命由原来 40 件提高到 80 件，单件节约成本 10 元，按年产 10 万套计算，可节约刀具费用 100 万。[2] 在曲轴箱上下端面铣削中加工线速度由 140m/min 提高到 190m/min，材料去除率由 92.4 cm³/min 提高到 120 cm³/min，表面粗糙度由 Ra3.2 提高到 Ra1.6，刀具寿命由原来 100 件提高到 450 件，单件节约成本 12 元，按年产 10 万套计算，可节约刀具费用 120 万。

山东省章丘鼓风机股份有限公司是国内风机行业的龙头上市企业，目前已成为集罗茨鼓风机、离心风机、工业泵、工业水处理工程及设备、重型机械设备、气力输送成套系统、电气设备、MVR 蒸发浓缩与结晶技术和成套系统等产品的研发、生产、销售于一体的现代化机械加工企业，近年我公司产品市场占有率不断攀升，生产节拍紧张，而刀具质量与可靠性一直制约着生产效率，急需高可靠性刀具产品保证生产节奏。我公司与山东大学合作开展“高速切削加工及陶瓷刀具的推广应用技术”产学研工作，成功地将新型增韧补强陶瓷刀具应用到了鼓风机零部件切削加工生产线上，取得了显著的效益（附件 19），典型案例如下：[1] 在鼓风机墙板、油箱等零件的镗孔工序中，采用原位晶须增韧陶瓷刀片，切削线速度由 120m/min 提高到 260m/min，在加工表面粗糙等质量指标不变的前提下，切削效率提高为原来的 2 倍以上，刀具寿命由原来的平均 50 件提高到平均 150 件，单件节约成本 85 元，按年产 1.8 万件计算，可节约刀具费用 153 万。[2] 在鼓风机轴的车削加工中，采用自扩散微叠层复合陶瓷刀片切削线速度由 120m/min 提高到 380m/min，在加工表面粗糙等质量指标不变的前提下，切削效率提高为原来的 3 倍以上，刀具寿命由原来的平均 2 件提高到平均 6 件，单件节约成本 100 元，按年产 1.2 万件计算，可节约刀具费用 120 万。

液压阀是一种广泛应用的机械部件，其中的阀芯、阀套均属精密零件。为保证产品高质量和可靠性，日照海卓液压有限公司采用具有优异性能的工具钢、轴承钢和不锈钢等材料制造阀组件，由此也带来刀具寿命降低、加工成本提高和加

工质量不易保证的难题。为此，本公司与山东大学合作开展“阀类组件高速切削加工及陶瓷刀具的推广应用技术”产学研工作，成功地将新型陶瓷刀具应用到了多型号阀组件的加工生产线，部分替代了硬质合金刀具（附件 20），典型案例如下：[1] 在 1Cr18Ni9Ti、0Cr7NiCu4Nb 不锈钢阀芯车削精加工中，采用 CT 系列金属陶瓷刀片切削速度由 50 m/min 提高到 200 m/min，表面粗糙度达到 Ra0.2 要求，刀具寿命提高到 400 件，单件节约成本 20 元，按年产 5 万件计可节约刀具费用 100 万。[2] 在 Cr12MoV 模具钢阀芯车削精加工中，采用 CT 系列金属陶瓷刀片切削速度由 75 m/min 提高到 150 m/min，表面粗糙度达到 Ra0.2 要求，刀具寿命提高到 240 件，单件节约成本 15 元，按年产 5 万件计可节约刀具费用 75 万。[3] 在孕育铸铁阀套的镗削精加工中，采用 CN 系列氮化硅刀片加工线速度由 140m/min 提高到 300m/min，表面粗糙度提高到 Ra1.6，刀具寿命提高到 250 件，单件节约成本 12 元，按年产 5 万套计算，可节约刀具费用 60 万。

六、曾获科技奖励情况

无

七、主要知识产权证明目录

1. 国家发明专利：一种微米-纳米多尺度复合陶瓷刀具材料及其制备工艺，专利号：ZL2012105534951，专利申请日期：2012 年 12 月 19 日，授权公告日：2014 年 4 月 30 日，（专利权人：山东大学，发明人：黄传真，殷增斌，邹斌，刘含莲，朱洪涛，王军）
2. 软件著作权：黄传真，朱小辉，刘含莲，邹斌，朱洪涛，陶瓷刀具材料微观尺度有限元模拟软件。登记号 2011SR030146，证书号：软著登字第 0293820 号，登记日期 2011 年 5 月 20 日
3. 软件著作权：黄传真，成红梅，刘含莲，邹斌，朱洪涛，纳米复合陶瓷刀具

材料多尺度模拟软件。登记号 2014SR135793，证书号：软著登字第 0805033 号，登记日期 2014 年 9 月 10 日

4. 软件著作权：黄传真，周婷婷，刘含莲，邹斌，朱洪涛，王军，陶瓷刀具材料微观组织和微观断裂行为模拟软件。登记号 2014SR133570，证书号：软著登字第 0802812 号，登记日期 2014 年 9 月 04 日
5. 国家发明专利：原位生长碳氮化钛晶须增韧氧化铝基陶瓷刀具材料粉末及其制备工艺，专利号：ZL200610043597.3，专利申请日期：2006 年 4 月 14 日，授权公告日：2008 年 9 月 10 日，（专利权人：山东大学，发明人：黄传真，刘炳强，刘含莲，刘战强，艾兴）
6. 国家发明专利：原位生长碳化钽晶须增韧氧化铝基陶瓷刀具材料及其制备工艺，专利号：ZL200110401147.8，专利申请日期：2011 年 12 月 06 日，授权公告日：2013 年 07 月 03 日，（专利权人：山东大学，发明人：黄传真，赵国龙，刘含莲，邹斌，崇学文，徐亮，朱洪涛，刘战强）。
7. 国家发明专利：原位生长二硼化锆晶须增韧陶瓷刀具材料及其一体化制备工艺，专利号：ZL201110361931.0，专利申请日期：2011 年 11 月 15 日，授权公告日：2013 年 5 月 15 日，（专利权人：山东大学，发明人：黄传真，徐亮，刘含莲，邹斌，崇学文，朱洪涛，刘战强）。
8. 软件著作权：黄传真，邹长斌，邹斌，刘含莲，朱洪涛，姚鹏，王军，低缺陷陶瓷刀具设计数据库软件。登记号 2014SR132655，证书号：软著登字第 0801897 号，登记日期 2014 年 9 月 03 日
9. 国家发明专利：一种金属陶瓷微细铣刀的制造方法及铣刀，邹斌，周辉军，徐开涛，王一顺，授权专利号：CN106825713，专利申请日：2017 年 2 月 21 日，授权公告日：2019 年 03 月 19 日
10. 国家发明专利：一种自扩散梯度功能复合材料及制备方法，邹斌，黄传真，王军，季文彬，刘含莲，姚鹏，朱洪涛，徐开涛，授权专利号：ZL201410129469.5，专利申请日期：2014 年 04 月 01 日，授权公告日：2016 年 06 月 08 日

八、主要完成人情况表

1、姓名：黄传真 排名： 1 技术职称： 教授

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：创新性成果一中的发明①：基于高温力学性能演变和切削可靠性的陶瓷刀具增韧补强设计理论（支撑材料见发明专利-附件 1），发明②：陶瓷刀具微观组织、制备工艺、力学性能、切削可靠性的模拟方法（支撑材料见软件著作权-附件 2、3、4）；创新成果二中的发明①：陶瓷刀具的原始组分原位化学合成与刀片坯体热压烧结一体化制备技术（支撑材料见专利-附件 5、6、7）；创新成果三中的发明点：首次发明了 TiC 晶须增韧 Al₂O₃ 陶瓷刀具系列（支撑材料见发明专利-附件 5、6），首次发明了 TiB₂ 棒晶原位增韧陶瓷刀具系列（支撑材料见发明专利-附件 7），发明了低缺陷 Ti(C,N)金属陶瓷刀具系列（支撑材料见软件著作权-附件 8）。

2、姓名：邹斌 排名： 2 技术职称： 教授

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：创新性成果二中的发明②中的发明点：首创了金属陶瓷微细铣刀制造技术（支撑材料见专利-附件 9）；创新性成果二中的发明③：发明了微叠层陶瓷刀具自扩散制备技术（支撑材料见专利-附件 10）；创新性成果三中的发明点：首次发明了金属陶瓷微铣刀精密刀具系列（支撑材料见专利-附件 9），首次发明了自扩散微叠层陶瓷刀具系列（支撑材料见专利-附件 10）。

3、姓名：刘含莲 排名： 3 技术职称： 教授

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：创新成果二中的发明①中的发明点：发明了原位生长 TiB_2 棒晶增韧陶瓷刀具一体化制备技术（支撑材料见专利-附件 7）；

4、姓名：王军 排名：4 技术职称：教授

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：创新成果一中的发明①中的发明点：基于组分-微观组织-性能协同设计的陶瓷刀具增韧补强理论（支撑材料见专利-附件 1）。

5、姓名：朱洪涛 排名：5 技术职称：副教授

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：创新成果一中的发明②中的发明点：发明了增韧补强陶瓷刀具烧结工艺预知的模拟算法（支撑材料见软件著作权-附件 3）。

6、姓名：姚鹏 排名：5 技术职称：副教授

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：创新成果二中的发明②中的发明点：发明了 Ti (C,N) 基金属陶瓷刀具的低缺陷制备技术（支撑材料见软件著作权-附件 8）。