

2017 年度国家科技进步奖公示内容

项目名称	难加工脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用
推荐单位意见	
<p>该项目提出了系统的脆性碳素零部件高速精密加工方法,指导脆性碳素零部件高速精密加工工艺优化与工程应用。发明了单位产能和加热效率高和节能的基于切削加工性与功能性协同优化的多晶硅铸锭炉碳素热场,以及容量大、智能化和易装配 PECVD 石墨舟;发明了大型薄片式光伏碳素零部件高效无损伤精密钻孔加工技术、基于加工变形预测的薄壁石墨件高效精密铣削加工工艺优化方法;发明了碳素零部件加工用耐磨纳米复合涂层刀具和金刚石膜刀具制造新方法;研发的石墨舟、碳素热场和石墨电极产品在太阳能、模具骨干企业中得到应用推广,近三年累计新增销售额 51.3 亿元,新增利润 5.7 亿元,产生了良好的社会经济效益。相关技术已通过科技成果鉴定和权威检测。该项目获授权发明专利 12 件,实用新型专利 43 件,软件著作权 2 项,发表论文 30 篇,SCI/EI 收录 17 篇,培养博硕士 9 人。该项目获 2014 年广东省科学技术奖一等奖。</p> <p>推荐该项目为国家科学技术进步奖二等奖。</p>	
项目简介 (限 1200 字)	
<p>多晶硅铸锭炉核心加热装置的碳素热场决定了多晶硅结晶的生产能耗、生产效率和成本;作为硅太阳能电池表面镀溅反射膜载体的大型石墨舟,是太阳能光伏电池的重要核心部件,直接影响太阳能硅片的镀膜质量;精密模具电加工石墨电极是提高模具制造水平的重要方法。在本项目实施之前,国内碳素热场、石墨舟均被国外垄断;精密模具电加工只使用铜电极。自主开发易脆性断裂与变形、加工质量低和刀具磨损严重的非均质多孔脆性碳素零部件高效精密设计和制造关键技术,既是发展我国光伏行业和模具制造业的急需,也是参与国际竞争的必要前提。</p> <p>本项目在国家和企业项目资助下,开展了十几年的深入自主创新研究,在大型薄壁和微细结构典型难加工碳素零部件优化设计、高效精密加工的理论及关键技术及核心产品的研发与工程应用方面,取得的主要科技创新如下:</p> <p>1) 提出了大型薄片式光伏碳素零部件高效无损伤精密钻孔加工技术;发明了单位产能和加热效率高和节能的基于切削加工性与功能性协同优化的多晶硅铸锭炉碳素热场,</p>	

以及容量大、智能化和易装配 PECVD 石墨舟；实现了碳素制品的整体性能提升。碳素热场使国际最先进的 GT 公司多晶硅铸锭炉产能从 450kg 提高到 850kg，产能提高 88%，单位能耗降低 30%。高精度低碎片率石墨舟可满足机器人装片要求，在不改变设备部件情况下提高生产效率 26%。

2) 提出了基于加工变形预测的薄壁石墨件高效精密铣削加工工艺优化理论与方法；发明了薄壁微细石墨电极高效精密加工新方法；形成了高精度薄壁、针状和微孔等微细结构石墨电极高效无损伤精密加工成套应用技术；在国内率先系统解决了薄壁微细石墨电极易崩碎与变形等加工技术难题，实现在精密模具制造业的工程化应用。

3) 提出系统的脆性碳素零部件高速精密加工理论，指导脆性碳素零部件高速精密加工工艺优化与工程应用；发明了碳素零部件加工用耐磨纳米复合涂层刀具和金刚石膜刀具制造新方法；全面提高了碳素零部件加工质量和效率。

研发的石墨舟、碳素热场和石墨电极产品在太阳能、模具骨干企业中得到应用推广；近三年累计新增销售额 51.3 亿元，新增利润 5.7 亿元。中国光伏协会认为“产品已在美国 GT SOLAR、高佳太阳能股份有限公司等多家知名太阳能光伏企业进行了应用和推广,产品质量在业界得到广泛认可，成功实现光伏产业碳素制品国产化”。研发的薄壁微细石墨电极在国内若干知名企业应用推广，中国模具协会认为这一成果“引领和促进了石墨电极技术在模具制造业推广应用和技术进步”。

本项目获授权发明专利 12 件，实用新型专利 43 件，获软件著作权 2 项，发表论文 30 篇，SCI/EI 收录 17 篇，培养博硕士 9 人。本项目获 2014 年广东省科学技术奖一等奖。

客观评价

1. 技术比较

本项目 PECVD 石墨舟工艺点孔公差能达到 $\pm 0.005\text{mm}$ ，是国内唯一能够完全达到机器人安装石墨舟装片工艺低碎片率要求的石墨舟。在不改变设备部件情况下，主流设备 125-19 设备效率可提高 26%，156-19 设备效率可提高 29%，大大提高了设备利用率和产能，可节约 PE 设备 367 台，约合人民币 110.1 亿元，同时降低了生产成本，单台石墨舟降低了 4 万元成本，总计约 5.79 亿元。本项目研究开发设计的多晶硅铸锭炉碳素热场与国际主流美国 GT 公司产品相比，在不改变多晶硅铸锭炉设备前提下，将原有低产能的 450kg、650kg 的炉子升级为高效能低能耗的 800kg；产能提高 88%，降低能耗 30%。见附件 13。

2. 检测报告

本项目研究开发的金刚石薄膜涂层铣刀经国家刀具质量监督检验中心检验，在相同的实验条件下切削 600m 后，力博、范霍恩（VanHoorn）、山高（seco）的金刚石薄膜涂层铣刀端面后刀面平均磨损和周刃平均磨损量相近，因此，三种刀具切削性能水平相当。本项目研究开发的石墨电极最细可达 60X60， $\Phi 0.15\text{mm}$ ，高 15mm；达到可见报道最高水平。

3. 鉴定结论

研究成果“面向大型薄壁微脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用”经瞿金平院士为主任的鉴定委员会鉴定，认为该成果解决了碳素零部件的崩边、碎裂、断裂和加工精度及表面质量难以保证的难题；研制的大型太阳能光伏产业用石墨舟石墨热场等的设计和加工方法，实现了高位置精度和尺寸精度的石墨零部件的加工；研发的石墨用金刚石涂层刀具的研磨性达到了国际同类产品的先进水平；该成果技术成熟度高，主要成果均实现产业化，获得了显著的经济和社会效益，市场前景广阔。鉴定委员会一致认定该成果总体技术达到国内领先水平，在金刚石涂层刀具工艺技术方面达到国际先进水平。

4. 科技奖励

“难加工脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用”获 2014 年广东省科学技术一等奖。该项目研究成果已在多家知名企业得到应用和推广，产品质量在业界得到广泛认可，并取得了可观的经济效益。

5. 同行评价

中国模具工业协会副理事长兼秘书长武兵书在 2016 年 9 月 28 日由广东省机械工程学会和广东省机械模具科技促进协会主办的“石墨电极加工与应用技术研讨会”上的致辞中表示，广东工业大学与国内专业从事石墨电极及其制品设计、制造和应用多家公司针对石墨电极高速加工和石墨电极应用技术研究与应用，开展了长期深入的全面合作，形成了以石墨材料供应商（外企）、石墨零部件加工专业化企业、石墨加工刀具制造企业、石墨电极电加工模具应用企业为主体的产学研用相结合的技术创新体系，对石墨电极加工与应用技术开展了深入持续多年的系统研究，取得了多项创新成果，并在《模具工业》、《电加工》、《制造技术与机床》等杂志上发表了多篇高水平文章，培养了大批石墨电极制造与应用技术人才，共同推动石墨电极技术在模具制造中的普及应用和加

工与应用技术水平的提高。

6. 协会评议

中国光伏行业协会出具的证明显示：深圳市石金科技股份有限公司是中国光伏行业协会成员，其设计的石墨舟及多晶硅铸锭炉碳素热场等产品已在深圳丰盛装备股份有限公司（002088）、东方日升新能源股份有限公司（300118）、美国 GT SOLAR、高佳太阳能股份有限公司（03800, HK）等多家知名太阳能光伏企业得到应用和推广，产品质量在业界得到广泛认可，成功实现了光伏产业碳素制品国产化。

7. 查新报告

教育部科技查新工作站（G13）针对“面向大型薄壁微脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用”的查新报告显示：除本项目组研究成果外，国内外未见有与本查新项目查新点内容完全相同的文献报道，且与检索内容密切相关的 38 篇国内外研究报道中有 16 篇为本项目组研究成果或本项目组前期研究成果。

广东省科学技术情报研究所出具的关于“面向大型薄壁微脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用-石墨热场”的查新报告显示：除本项目组研究成果外，国内外未见有与本查新项目创新点内容完全相同的文献报道，本项目组研发石墨热场具有大容量、能耗低和良率高等优点。

广东省科学技术情报研究所出具的关于“面向大型薄壁微脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用-石墨舟”的查新报告显示：除本项目组研究成果外，国内外未见有与本查新项目创新点内容完全相同的文献报道，本项目组通过方法创新和加工设计优化使石墨舟有原来 15 片整舟的装配误差 $\pm 0.02\text{mm}$ 提升到 21 片整舟的装配误差 $\pm 0.01\text{mm}$ ，单个舟片精度成倍提升，提升了石墨舟的制造和装配工艺，提高定位柱与舟片的一致性，实现了大型薄壁脆性石墨零件预应力加工和石墨舟片高精度孔加工。

8. 论文引用

本项目共发表论文 30 篇，其中 SCI/EI 收录 17 篇，论文内容针对大型、薄壁、微脆脆硬性碳素零部件加工中工件易于破碎、崩边、刀具磨损严重、已加工表面质量、尺寸和位置精度难以保证等核心问题，对相关关键加工理论、加工工艺、加工刀具、应用技术及其在碳素石墨热场、模具等产业的应用等方面开展深入分析研究。其中创新点 1 发表核心论文 1 篇，创新点 2 发表核心论文 14 篇，创新点 3 发表核心论文 17 篇，项目成果论文他引次数共计 331 次。中文论文被多个网站引用作为技术资料。

9. 用户意见

① 上海东洋碳素有限公司及公司用户：深圳市石金科技股份有限公司与广东工业大学的相关石墨材料机械加工技术从 2001 年开始已在上海东洋碳素有限公司及公司用户中应用。在降低刀具损耗、节约生产成本、提高零件加工质量和加工效益等方面取得了良好的经济效益。

② 广东爱康太阳能科技有限公司：深圳市石金科技股份有限公司生产的石墨舟制品自 2010 年在广东爱康太阳能科技有限公司得到应用，提高了硅片表面质量。采用石金提供的 21 片石墨舟代替国外 15 片石墨舟，使生产效率增加了 26%，降低了生产成本。

③ 江西旭阳雷迪科技股份有限公司：深圳市石金科技股份有限公司自主研发的碳素热场自 2009 年在江西旭阳雷迪科技股份有限公司得到应用，在原有炉腔不变的情况下使原来装料 450kg、650kg 提高到 850kg，工艺一致性得到提高，降低单位能耗 30% 以上，良品率提高了 3%，实现替代了国外产品。

④ 深圳市迈高机械工具有限公司：广东工业大学与深圳市力博刀具公司的金刚石涂层刀具自 2009 年 12 月在深圳市迈高机械工具有限公司得到应用，保证了各类石墨零部件的高质量加工，降低了生产成本。

⑤ GT SOLAR 国际有限公司：该项目成果碳素热场在 GT SOLAR 国际有限公司得到应用，产生良好经济效益。

⑥ 商洛比亚迪实业有限公司：该项目成果碳素热场在商洛比亚迪实业有限公司得到应用，产生良好经济效益。

推广应用情况

(1) 碳素热场零部件设计与精密制造及其产业化方面的技术成果，已在深圳市石金科技股份有限公司得到了全面应用；2014 年及 2015 年成套多晶硅热场销售数量稳居行业前三甲；本项目设计的新型碳素热场加热效率高、能耗低，制造的碳素热场机加工质量和精度高，生产效率显著提高，生产成本大大降低，经济效益显著，为行业内所有主流多晶硅炉型（GT、ALD、精工、京运通、晶盛、汉虹）提供整套热场解决方案。在美国 GT SOLAR、高佳太阳能股份有限公司（03800.HK）等多家太阳能光伏企业进行了应用推广。

(2) 石墨舟设计与精密制造及其产业化方面的技术成果，已在深圳市石金科技股份有限公司得到了全面应用，并在包括深圳丰盛装备股份有限公司（002008）、东方日升

新能源股份有限公司（300118）在内的多家太阳能光伏企业进行了应用和推广。采用本项目技术设计制造的石墨舟加工质量好，装配精度和加工效率高，保证了硅片的加工精度一致性。

（3）在薄壁微细结构石墨电极的设计与制造方面的工艺技术成果已在包括深圳市金科技股份有限公司、深圳市昌红科技股份有限公司（300151）、广州毅昌科技集团有限公司（002420）、阿雷斯提精密模具（广州）有限公司、康奈可（广州）汽车模具制造有限公司、广州市中新塑料有限公司、广州毅远塑胶五金模具有限公司等进行了应用和推广。在石墨电极放电模具精密制造应用方面的工艺技术成果已在广州毅昌科技股份有限公司、北方海拉车灯有限公司等进行应用和推广。采用本项目技术进行薄壁结构石墨电极加工时，加工质量好，而且电火花加工出的模具加工精度和表面质量好，生产效率高，降低了生产成本，经济效益显著。

（4）在碳素材料高速加工刀具设计与制造等方面的工艺技术成果，已在深圳市力博刀具技术有限公司、深圳市银宝山新科技股份有限公司、比亚迪精密制造有限公司等进行了应用和推广，采用本项目技术研发的金刚石涂层刀具进行石墨制品生产时，加工质量和尺寸精度高，加工效率高刀具寿命长，大大降低了生产成本，可以替代国外同类产品，经济效益显著。

主要应用单位情况表

序号	应用单位名称	联系人	联系电话	应用起始时间	应用技术	经济效益 (万元)
1	美国 GT SOLAR	周以兵	021-52887272	2011.4.6-2014.6.30	石墨舟和热场设计与高速精密加工技术	2161
2	商洛比亚迪实业有限公司	邵清选	0914-2898888	2009.2.20 至今	石墨舟和热场设计与高速精密加工技术	702
3	江苏协鑫硅材料科技有限公司	王慧慈	0516-83778888	2010.6.1 至今	石墨舟和热场设计与高速精密加工技术	6800
4	深圳丰盛装备股份有限公司 【002008】	谭丹	0755-86161505	2010.5.5 至今	石墨舟和热场设计与高速精密加工技术	691
5	青岛赛瑞达电子装备股份有限公司	王鹏	0532-87666589	2008.11.7-2014.10.30	石墨舟和热场设计与高速精密加工技术	666
6	广东爱康太阳能科技有限公司	陈红艳	0757-87362056	2010.12.14 至今	石墨舟和热场设计与高速精密加工技术	439
7	康奈可(广州)汽车模具制造有限公司	沈明风	020-66803328	2010.6.5 至今	高速精密加工工艺技术与数控编程方法	599
8	阿雷斯提精密模具(广州)有限公司	朱永平	020-82461670	2007.2.12 至今	石墨电极高速精密加工工艺与数控编程	543
9	广州毅昌精密模具厂	朱先生	020-33300934	2009.11.5-2014.3.30	石墨电极高速精密加工工艺与数控编程	147
10	广州毅远塑胶五金模具有限公司	罗忠娥	020-86456658	2008.4.6 至今	石墨电极高速精密加工工艺与数控编程	350

11	柯尼卡美能达咨询(深圳)有限公司	张志华	0755-25980889	2010.3.30 至今	石墨电极精密高速加工和电火花加工的精密模具综合高效高精制造技术	43000
12	兄弟工业(深圳)有限公司	肖珑华	0755-89785568-854	2009.7.30 至今	石墨电极精密高速加工和电火花加工的精密模具综合高效高精制造技术	66100
13	Zebra Technologies Corporation	Neil	0755-89785568-843	2008.8.9 至今	石墨电极精密高速加工和电火花加工的精密模具综合高效高精制造技术	2610
14	深圳市银宝山新科技股份有限公司	杨娟峰	0755-27643170	2010.2.9 至今	石墨高速加工刀具设计、制造及应用技术	716
15	比亚迪精密制造有限公司【1211.HK】	薛忠玉	0755-89888888-54265	2009.9.2 至今 4	石墨高速加工刀具设计、制造及应用技术	180
合计						126659

主要知识产权目录(不超过 10 件)							
序号	知识产权类别	知识产权具体名称	授权号	证书编号	权利人	发明人	发明专利有效状态
1	发明专利	一种纳米复合钛铬硅氮化物刀具涂层及其制备方法	ZL201010176320.4	891918	广东工业大学	王成勇、成晓玲、余东海、张凤林、匡同春	授权
2	发明专利	一种纳米复合钛铬铝硅氮化物刀具涂层及其制备方法	ZL201010176236.2	859041	广东工业大学	王成勇、成晓玲、余东海、张凤林、匡同春	授权
3	发明专利	一种纳米复合钛铝硅氮化物刀具涂层及其制备方法	ZL 2010 10176335.0	972142	广东工业大学	王成勇、成晓玲、余东海、张凤林、匡同春	授权
4	发明专利	金刚石材料抛光方法	ZL 2003 10111774.3	3403842	广东工业大学	王成勇、张凤林、陈春林、匡同春	授权
5	发明专利	一种化学机械法金刚石薄膜抛光装置及其抛光方法	ZL 2005 10034023.5	372203	广东工业大学	王成勇、陈冲、秦哲、张凤林	授权
6	发明专利	腔式石墨舟	ZL 2011 10082405.0	1188971	深圳市石金科技股份有限公司	张志勇、李文红、朱佰喜、王成勇、南志华	授权
7	发明专利	石墨舟定位柱装配方法	ZL 2011 10082399.9	1117093	深圳市石金科技股份有限公司	朱佰喜	授权
8	发明专利	多晶硅铸锭炉热场结构	ZL 2011 10122386.X	972493	深圳市石金科技股份有限公司	南志华、李文红、朱佰喜、王成勇、翟雨佳	授权
9	发明专利	半导体热处理	ZL 2011 1	972168	深圳市石金	李文红、朱	授权

		真空炉热场结构	0105436.3		科技股份有限公司	佰喜、南志华、韩伶俐	
10	发明专利	金刚石薄膜涂层刀具对精密细小石墨电极的加工方法	ZL 2010 1 0234411.9	944956	深圳市昌红科技股份有限公司	张泰	授权
主要完成人情况							
第（一） 完成人	姓名	王成勇	完成单位	广东工业大学	工作单位	广东工业大学	
	对本项目主要贡献： 项目总负责人，1) 提出石墨高速精密加工基础理论和工艺优化方法；发明碳素材料加工用硬质合金涂层、金刚石涂层刀具设计制造及应用技术。2) 对科技创新点 1、2 和 3 做出创造性贡献，是专利 1、2、3、4、5 的发明人，3) 获发明专利 7 项、发表论文 30 篇。						
	曾获得国家科技奖情况：无						
第（二） 完成人	姓名	朱佰喜	完成单位	深圳市石金科技股份有限公司	工作单位	深圳市石金科技股份有限公司	
	对本项目主要贡献： 1) 发明多种新型石墨舟、碳素热场及其零部件结构设计与高速精密加工方法；发明石墨电极高速精密加工工艺技术；2) 对科技创新点 1、2 和 3 做出了重要贡献；是专利 6、7、8、9 的发明人，3) 获发明专利 4 项，实用新型专利 2 项。						
	曾获得国家科技奖情况：无						
第（三） 完成人	姓名	张泰	完成单位	深圳市昌红科技股份有限公司	工作单位	深圳市昌红科技股份有限公司	
	对本项目主要贡献： 1) 发明石墨电极在模具精密制造中的应用技术；2) 对科技创新点 2 做出了重要贡献；是专利 10 的发明人。						
	曾获得国家科技奖情况：无						
第（四） 完成人	姓名	李文红	完成单位	深圳市石金科技股份有限公司	工作单位	深圳市石金科技股份有限公司	
	对本项目主要贡献： 负责省部产学研项目的总体研究与开发。对本项目技术创造性贡献：1) 发明多种新型石墨舟、碳素热场及其零部件结构设计与高速精密加工方法；发明石墨电极高速精密加工工艺技术；2) 对科技创新点 1、2 和 3 做出了重要贡献，是专利 6、8、9 的发明人；3) 获发明专利 3 项，实用新型专利 1 项。						
	曾获得国家科技奖情况：无						
第（五）	姓名	周莉	完成单位	广东技术师范学院	工作单位	广东技术师范学院	

完成人	<p>对本项目主要贡献：</p> <p>1) 提出脆性石墨材料高速精密加工应用基础理论和工艺优化原则；发明碳素材料高速加工用硬质合金涂层刀具设计制造及应用技术；2) 对科技创新点 1、3 和 4 做出了创造性贡献；3) 发表论文 7 篇，其中 SCI 收录论文 3 篇。</p> <p>曾获得国家科技奖情况：无</p>					
第（六） 完成人	姓名	周玉海	完成单位	广东工业大学	工作单位	广东工业大学
	<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>1) 发明了碳素零部件加工用耐磨纳米复合涂层刀具和金刚石膜刀具制造新方法；2) 对科技创新点3和4做出了创造性贡献。3) 发表论文2篇，实用新型专利1件，已鉴定及登记的科技成果鉴定证书（第六完成人）。</p>					
	曾获得国家科技奖情况：无					
第（七） 完成人	姓名	吴建军	完成单位	深圳市力博刀具技术有限公司	工作单位	深圳市力博刀具技术有限公司
	<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>1) 发明了碳素零部件加工用耐磨纳米复合涂层刀具和金刚石膜刀具制造新方法；2) 对科技创新点3做出了创造性贡献；支持材料：已鉴定及登记的科技成果鉴定证书（第八完成人）。</p>					
	曾获得国家科技奖情况：无					
第（八） 完成人	姓名	吴华钊	完成单位	深圳恒佳精密模具注塑有限公司	工作单位	深圳恒佳精密模具注塑有限公司
	<p>对本项目主要贡献：</p> <p>1) 发明精密模具电火花加工用薄壁和微细结构石墨电极的高速精密加工工艺优化和编程技术；发明石墨电极在模具精密制造中的应用技术。2) 对科技创新点2做出了重要贡献；支持材料：已鉴定及登记的科技成果鉴定证书（第九完成人）。</p>					
	曾获得国家科技奖情况：无					
第（九） 完成人	姓名	秦哲	完成单位	广东工业大学	工作单位	广东工业大学
	<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>1) 发明了薄壁微细石墨电极高效精密加工新方法，提出了基于加工变形预测的薄壁石墨件高效精密铣削加工工艺优化方法，形成了高精度薄壁、针状和微孔等微细结构石墨电极高效无损伤精密加工成套应用技术。2) 对科技创新点 2 做出了重要贡献；支持材料：已鉴定及登记的科技成果鉴定证书（第十完成人），发表论文 7 篇。</p>					
	曾获得国家科技奖情况：无					
第（十） 完成人	姓名	郑李娟	完成单位	广东工业大学	工作单位	广东工业大学
	<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>1) 对碳素材料高速加工用硬质合金涂层刀具和金刚石涂层刀具的设计、制造做出了创造性贡献。2) 对科技创新点2做出了重要贡献；支持材料：实用新型专利1件，已鉴定及登记的科技成果鉴定证书（第十五完成人）。</p>					
	曾获得国家科技奖情况：无					

主要完成单位创新推广贡献

第一完成单位 | 广东工业大学

广东工业大学设有机械工程一级学科博士学位授权点、博士后流动站,教育部微电子精密制造技术与装备重点实验室、广东省微纳加工技术与装备重点实验室;研究团队拥有国家千人计划人才、青年千人计划人才,省创新团队、珠江学者等优势人才;以及先进的机械加工与测试、材料性能分析测试和计算机仿真等良好的实验设备与仪器。

广东工业大学在本项目中主持和完成国家自然科学基金项目“高性能石墨材料高速铣削加工中的摩擦磨损特性研究”(50605008)研究和结题,负责广东省教育部产学研结合项目“多晶硅铸锭用高品质石墨热场的设计与制造技术研究”(2011B090400606)高校方面项目研究。提出了石墨高速铣削、钻孔加工断裂与变形机理、刀具磨损破损机理等理论,研发系列脆性碳素零部件高速加工工艺优化方法;研制了优选刀具和加工参数的石墨高速加工工艺数据库。提出了控制石墨电极加工变形与断裂的方法;发明了高精度薄壁、针状和微孔等微细结构石墨电极高效无损伤加工方法;提出了大型薄片式脆性碳素零部件 PECVD 石墨舟、碳素热场等的无崩损高速铣削、钻孔工艺技术;提出了碳素材料高速加工用涂层刀具的设计新方法;发明了耐磨 TiSiAlN 涂层刀具;研制了管理刀具寿命的石墨加工刀具管理系统。已鉴定及登记的科技成果“面向大型薄壁微细脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用”第一完成单位;获发明专利 5 件(序号 6-10),软件著作权 2 项;企业标准 1 项(电加工石墨电极),发表论文 30 篇,指导和培养博士研究生 2 名,硕士研究生 7 名。

第二完成单位 | 深圳市石金科技股份有限公司

深圳市石金科技股份有限公司(原深圳市石金科技公司)简称石金科技,证券代码 833069;,为市重点扶持的国家级高新技术企业,市高新技术产业协会、市机械行业协会会员企业。是国内最具有声誉、石墨制品加工技术领先的专业碳素制品生产企业。与广东工业大学有十多年的石墨与碳素材料加工与应用技术的产学研合作,合作承担多个科研项目,支持和培养研究生多名。

深圳市石金科技股份有限公司在本项目中负责广东省教育部产学研结合项目“多晶硅铸锭用高品质石墨热场的设计与制造技术研究”(2011B090400606)企业方面项目研究和结题;支持和配合国家自然科学基金项目“高性能石墨材料高速铣削加工中的摩擦磨损特性研究”(50605008)研究。研发系列脆性碳素零部件高速加工工艺优化方法;研制并产业化多种精密薄壁微细石墨电极及其在精密模具高效电加工中的应用技术。发明了石墨舟、碳素热场及其关键零部件优化设计方法;研制并产业化高效低能耗石墨舟、碳素热场。协助指导和培养博士研究生 1 名,硕士研究生 4 名。已鉴定及登记的科技成果“面向大型薄壁微细脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用”的第二完成单位;获发明专利 5 件,实用新型专利 36 件,企业标准 3 项(电加工用石墨电极、石墨舟、热场),软件著作权 2 项。

第三完成单位 | 深圳市昌红科技股份有限公司

深圳市昌红科技股份有限公司简称昌红科技,为上市公司(SZ300151),经营范围主要包括非金

属制品模具设计、加工、制造；塑胶制品、模具、五金制造；消费性电子产品生产加工；经营进出口业务；模具技术咨询及服务。昌红科技与广东工业大学自 2007 年开始了产学研合作，从事石墨电极加工、石墨电火花加工模具技术等研究与开发；广东工业大学许可其使用金刚石膜刀具制造专利一项。

在本项目中昌红协助完成国家自然科学基金项目“高性能石墨材料高速铣削加工中的摩擦磨损特性研究”(50605008)研究和结题。研制微细石墨电极高效无损伤加工方法；研制多种精密薄壁微细石墨电极及其在精密模具高效电加工中的应用技术。协助指导和培养博士研究生 1 名，硕士研究生 2 名。已鉴定及登记的科技成果“面向大型薄壁微细脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用”的第三完成单位；获发明专利 2 件，实用新型专利 4 件。

第四完成单位 | 深圳市力博刀具技术有限公司

深圳市力博刀具技术有限公司简称力博刀具，主要从事石墨和模具钢切削刀具、刀柄夹持系统以及相关的加工工艺系统服务领域。自公司成立起，与广东工业大学建立了产学研合作关系，从事石墨加工刀具等的研发工作，并支持研究生的培养。

深圳市力博刀具技术有限公司提出了碳素材料高速加工用涂层刀具的设计、制造新方法；研制并产业化的金刚石涂层刀具寿命经权威检测达国际先进水平。协助指导和培养硕士研究生 2 名。已鉴定及登记的科技成果“面向大型薄壁微细脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用”第四完成单位；委托国家刀具质量监督检验中心对应用项目成果研制金刚石薄膜涂层铣刀的切削性能进行对比测试评价并出具检验报告，得出在金刚石涂层刀具寿命达到国际先进水平结论。获实用新型专利 1 件，企业标准 1 项（金刚石薄膜涂层铣刀），国家刀具质量监督检验中心检验报告 1 份。

第五完成单位 | 深圳恒佳精密模具注塑有限公司

深圳恒佳精密模具注塑有限公司简称恒佳精密模具，以石墨电极加工和模具数控加工和电火花加工为主，已全面实现 CIMS 的现代化精密模具生产和注塑产品成型加工制造，配有数控加工中心、数控火花机、线切割机以及三坐标测量仪、专用试模机械和气辅等各类设备。自恒佳成立以来，与广东工业大学开展了石墨电极模具电火花加工工艺、模具高速加工等研究与开发。

在本项目中，恒佳精密模具研发石墨电极高速加工工艺优化方法；研制多种石墨电极及其在精密模具高效电加工中的应用技术。协助指导和培养硕士研究生 1 名。已鉴定及登记的科技成果“面向大型薄壁微细脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用”第五完成单位。

第六完成单位 | 广东技术师范学院

广东技术师范学院是一所具有硕士学位授予权的省属全日制普通高校，有 2 个广东省特色重点学科；拥有 2 个国家级、6 个省级特色专业建设点；1 个国家级、3 个省级专业综合改革试点项目，为全国重要的职教师资培养培训基地。

广东技术师范学院作为主要研究单位参与完成了国家自然科学基金项目“高性能石墨材料高速铣削加工中的摩擦磨损特性研究”(50605008)研究，提出了脆性石墨材料石墨高速铣削机理、刀具摩擦磨损机理；研制碳素零部件高速加工工艺优化方法；研制硬质合金涂层刀具设计与应用技术。协助指

导和培养硕士研究生 3 名。已鉴定及登记的科技成果“面向大型薄壁微脆性碳素零部件的高速精密加工关键技术及应用”第六完成单位；发表学术论文 12 篇，其中 SCI 收录 2 篇，EI 收录 2 篇。

完成人合作关系说明

本项目的完成单位包括：广东工业大学、深圳市石金科技股份有限公司（证券代码 833069）、深圳市昌红科技股份有限公司（证券代码 300151）、深圳恒佳精密模具注塑有限公司和广东技术师范学院。本项目是上述单位十多年的产学研合作研究成果。

自 2001 年以来，广东工业大学先后与深圳市石金科技股份有限公司（证券代码 833069）（原深圳市石金科技公司；专业从事石墨电极、石墨舟、石墨热场等碳素零部件制造）、深圳市昌红科技股份有限公司（股票代码：SZ300151；石墨电极制造与在模具中的应用；专业从事精密模具设计、加工和制造）、深圳恒佳精密模具注塑有限公司（石墨电极在模具加工中的应用；专业型大型模具制造公司）和广东技术师范学院建立了良好的研究合作关系，具体合作关系如下：

广东工业大学与深圳市石金科技股份有限公司的前身深圳协雅精密工业制品有限公司、深圳市石金科技公司于 2001 年开始建立产学研合作机构，在本项目研究中，深圳市石金科技公司主持广东省教育部产学研结合项目“多晶硅铸锭用高品质石墨热场的设计与制造技术研究”（2011B090400606）企业方面项目研究和结题，并支持和配合国家自然科学基金项目“高性能石墨材料高速铣削加工中的摩擦磨损特性研究”（50605008）研究。共同研究了精密模具电火花加工用薄壁和微细结构石墨电极的高速精密加工工艺优化和编程技术；大型薄板脆性碳素热场关键零部件的结构优化设计和高速精密加工工艺优化、脆性薄板石墨舟装配孔的设计与高速精密钻孔加工工艺；培养博士研究生 1 名，硕士研究生 4 名；获发明专利 5 件，实用新型专利 35 件，软件著作权 2 件，发表论文 2 篇。双方合作及成果在深圳市石金科技股份有限公司全国中小企业股份转让系统公开转让说明书中得到体现。

广东工业大学与深圳市昌红科技股份有限公司于 2007 年 8 月起联合组建了“昌红-广东工业大学模具制造研究开发中心”，针对精密模具电火花加工用薄壁和微细结构石墨电极的高速精密加工工艺优化和编程技术开展研究与推广应用，培养博士研究生 1 名，硕士研究生 2 名；获发明专利 2 件，实用新型专利 4 件；双方合作及成果在深圳市昌红科技股份有限公司首次公开发行股票招股说明书中得到体现。

广东工业大学与深圳市力博刀具技术有限公司于 2009 年开始建立产学研合作机构，合作研发碳素材料高速加工用涂层刀具的设计、制造、使用技术及其切削性能评价技术；培养硕士研究生 2 名；获实用新型专利 1 项，企业标准 1 项，国家刀具质量监督检验中心检验报告 1 份。

广东工业大学与深圳市恒佳精密模具注塑有限公司于 2002 年开始建立良好合作关系，研发石墨电极在模具加工中应用技术，培养研究生 1 名。广东工业大学与广东技术师范学院于 2007 年开始建立合作研究关系，开展石墨高速加工机理与工艺技术等方面的研究。发表学术论文 12 篇，其中 SCI 收录

2 篇，EI 收录 3 篇。

本项目完成人在研究工作中均有自己的研究领域和各自的专长，项目完成人在独立主持各自研究项目的同时，还合作承担了包括国家自然科学基金、省部产学研等科研项目。

在石墨电极高速加工基础理论与工艺研究方面：自 2001 年起，王成勇、周莉、秦哲、周玉海、李文红、朱佰喜等开始建立合作关系，共同研发了精密模具电火花加工用薄壁和微细结构石墨电极的高速精密加工工艺优化和编程技术。

在太阳能光伏石墨舟和碳素热场设计与精密制造方面：自 2007 年起，王成勇、周玉海、李文红、朱佰喜等开始建立合作关系，共同进行了大型薄板脆性碳素热场关键零部件的结构优化设计和高速精密加工工艺优化，以及脆性薄板石墨舟装配孔的设计与高速精密钻孔加工工艺研究。

在石墨电极进行模具精密制造技术研究方面：自 2002 年起，王成勇、周莉、秦哲、朱佰喜、李文红、张泰、吴华钊等开始建立合作关系，共同研发了基于石墨电极精密高速加工和电火花加工的精密切割综合高效高精制造技术；实施了专利技术的独家许可使用。

在石墨高速加工用刀具设计、制造及其应用技术研究方面：自 2009 年开始，王成勇、周莉、周玉海、郑李娟、吴建军等开始建立合作关系，共同开展了石墨高速加工用普通涂层硬质合金刀具、金刚石涂层刀具等的设计、制造、使用技术及其切削性能评价技术。