



郭东明院士（中）与团队成员共同研究高性能零件加工工艺 课题组供图

# “十年一实验”是什么体验？

## ——记国家自然科学基金创新研究群体项目“精密制造理论与技术基础研究”

■本报记者 张双虎

### “泡”在一线开展研究

传统机械加工中，切削刀具和磨削磨粒的硬度要比工件硬，是以“以硬磨软”方式去除材料。但这种方式会造成零件表面损伤，直接影响零件性能。像制造集成电路的单晶硅片，不仅要求具有高精度超光滑的表面，而且要严格控制加工表面损伤。对硬脆单晶硅材料，采用超硬金刚石砂轮磨削时，即使优化工艺参数，仍然不可避免地产生加工表面损伤。如何获得超低损伤表面是硬脆材料超精密磨削面临的难题。

“我们想，能不能用比工件软的磨粒来磨削，这样可以减小表面损伤。于是，我们引入化学作用，通过化学反应，生成比磨粒还软的反应膜，这就可用软磨粒砂轮去除表面材料，避免磨削损伤。这就是‘以软磨硬’。”郭东明说，“过去是纯机械作用的‘硬切’，现在用机械和化学作用相结合的‘软切’，将加工表面损伤降到最低。”

“从2002年开始，我们经过十几年研究，用

‘以软磨硬’的思路开发出超精密磨削新工艺——机械化学磨削工艺，也开发出系列化软磨粒砂轮。应用该工艺方法，我们实现了单晶硅片的超高精度超低损伤磨削。这种方法不但可以用于单晶硅加工，也可以用到蓝宝石、碳化硅等硬脆晶体加工上，具有很好的应用前景。”团队成员之一、大连理工大学教授康仁科说。

和其他研究机构不同，郭东明团队成员要“泡”在加工车间。“我们团队成员的第一个问题来自企业。”郭东明说，“很多青年教师有1/4的时间都在一线，研究生待在加工车间的时间就更多了。”2003年，郭东明团队来到一家企业，发现该企业有很好的材料，但加工效果并不理想。“对于碳纤维树脂基复合材料等高性能材料来说，如果加工工艺不好，会影响材料性能，甚至根本无法使用。”团队学术带头人之一、中科院院士贾振元说，“复合材料加工中经常出现分层、撕裂、毛刺等损伤。一有损伤它的性能就降低，这对高端装备制造来说是致命的。所以郭

老师为团队明确了这一研究方向，我们从基础研究开始，和企业一起攻关。”

经过大量实验和分析，研究人员发现力和热是造成零件加工损伤的主要原因。但加工过程中不可能不受力，也不可能没有热量产生。

“到底多大的力最好？多高的温度影响最小？怎么来控制力量和温度？这需从基础理论上去寻找答案。”贾振元说。

在国家自然科学基金等项目的支持下，研究人员通过大量实验，发现局部应力对加工件的影响最小。同时，加工时“反向剪切”既能大幅度减少损伤，又能将刀具寿命延长3-5倍，同时还大幅度简化了工艺。有了深厚基础研究后盾，该团队在精密制造理论与技术方面取得了一系列重大创新成果，多项成果用于重大型号研制与量产。

“在郭老师的带领下，我们建成了一支有影响力的队伍。我们和合作单位、相关企业关系密切，通过‘产学研用’的配合，我们的队伍也在实践磨炼中成长起来。”贾振元说。

“胖五”发力，“天问”腾空。火星探测让我们翘首以待。

鲜为人知的是，有一群人，为“胖五”部件加工进行了20多年研究。

在国家自然科学基金创新研究群体项目“精密制造理论与技术基础研究”（以下简称创新研究群体项目）支持下，来自大连理工大学的研究团队面向航空航天、信息电子、能源交通等领域对高性能航天的重大需求，系统研究了高性能复杂曲面零件精密制造、超高精度表面零件和复合材料构件精密加工、功能性表面层和多尺度微纳结构制造等理论与技术，解决了一批高端装备研制和高性能精密制造难题，成为精密制造领域国际一流的“创新军团”。

### 航天用户高度认可

“我们特别自豪。到火箭发动机制造厂，看到车间的高端装备一大片是我们做的。”该创新研究群体项目负责人、中国工程院院士郭东明的话语中难掩兴奋。

运载火箭发动机喷管、燃料箱共底构件的加工制造需满足导热、高强、密封等多项高性能要求，若按照原始设计进行常规数控加工，难以满足加工要求，成为制约我国运载火箭制造的核心难题之一。

“以前，此类零件的加工，火箭制造厂往往采用手工修整、反复试凑的方式，或要加工出多件来选出一个合格件，这导致火箭关键件制造周期长、成品率低，实际应用中可靠性也无法很好保障。”团队成员之一、大连理工大学副教授刘海波说，“随着我国高密度发射和航天任务的规划，这类需求非常迫切。”

上世纪90年代，郭东明意识到，装备制造已经从以往的以几何精度要求为主，跃升为以性能要求为主和性能与几何、材料并重的高端装备和产品制造。此后他提出“高性能精密制造”理念，带领团队与企业联合攻关，研发出关联面形约束的复杂曲面加工等系列工艺，解决

了大量薄壁复杂曲面零件精密加工难题。

“现在，我国这类发动机喷管冷却通道的加工都是采用我们研发的工艺和装备来完成。”刘海波说，“应用我们的工艺方法，典型喷管冷却通道的加工周期可以从50多天压缩为20天，产品一次合格率达到百分之百。所以，航天企业对我们的认可度非常高。”

### 十年“种”一颗金刚石磨粒

超精密加工精度往往达纳米量级，用金刚石颗粒制作的砂轮进行磨削达到这样的精度，其难度可想而知。“看清”磨削过程，搞清楚磨削过程中金刚石磨粒对工件材料的作用以及工件表面的微观变化，仅仅靠分子动力学仿真等理论分析远远不够，需要结合单颗粒金刚石的切削实验来模拟实际磨削，验证理论模型和分析结果。

“以前的切削实验中，金刚石颗粒切削速度低，与实际加工状态差别很大，不能反映实际磨削时材料去除状态。我们提出在实验砂轮上仅留单颗粒金刚石的纳米切深高速切削方法，不仅切削速度达到实际磨削速度，而且切削深度从零开始，由纳米量级逐渐增加到微米量级，获得了深度连续变化的超长划痕。在此基础上，就可以对工件表面划痕周围材料细微变化进行精确分析。”郭东明说，“仅这一个实验，我们就前后进行了十年。”

研究人员一开始通过显微镜在金刚石砂轮上选择留下单颗粒金刚石磨粒，制备成切片工具（单颗粒砂轮）来实验，后来又发现每颗金刚石磨粒的形状、表面形态都是随机的，这意味着该实验不可重复。

“于是，我们就想设计一种具有特定几何参数的单颗粒金刚石砂轮，采用一系列特殊工艺，将超硬的金刚石磨粒加工成需要的形状，再‘种’到指定位置。”郭东明说，“这种实验和分析方法为超精密磨削机理研究提供了先进的实验手段，对后来的工作帮助很大。”

## 致力“聚焦、贯通和融合”

《中国科学报》：您认为基础研究在解决应用技术上能起到怎样的作用？

郭东明：解决尖端技术问题不能局限于技术本身，因为突破技术瓶颈往往需要基础研究的突破作支撑。我们虽然做的是基础研究，但大部分问题来自生产实践。

要弄清需求、瞄准问题，就要求拿出一定的时间到企业去深入了解关键技术难题是什么、根源在哪儿，然后凝练出制约技术的基础理论问题，再进一步思考和研究如何取得突破。

基础研究积累不够，会导致遇到技术难题需回过头来做基础研究。基础研究和应用技术之间的关系很紧密，也特别复杂，互相影响甚至是耦合关系，这种复杂的关系单靠企业很难解决问题，往往需要多学科、多领域的人才合作，通过技术牵引下的基础理论突破来解决。

《中国科学报》：您的研究对我们成为“制

造强国”或解决制造业“卡脖子”问题能起到怎样的作用？

郭东明：要成为制造强国，关键是提高我们制造的质量和水平。

工艺上的进步，很大程度上取决于与之相关的基础研究支持。我国在高端装备方面的差距，源于我们对工艺研究和影响技术的基础理论研究不够深入、不够系统。超高精度加工并非只是简单的精度提高，影响精度的因素非常多，它牵涉诸多方面，一定程度讲，它也是一个系统工程。

要解决“卡脖子”问题，要成为制造强国，首先要解决超高精度制造方面的难题。我国在精密和超精密制造方面目前布局还远远不够，没有形成系统的力量。我希望我们在这方面的研究能弥补一部分或解决一部分问题。

《中国科学报》：在超高精度制造方面，目前我们处于什么水平？团队下一步的发力点在哪里？

# 千锤百炼 给有色冶金加点“智慧”

## ——记国家自然科学基金创新研究群体项目“复杂有色冶金过程控制理论、技术与应用”

■本报记者 甘晓

6月的长沙，新冠疫情趋于平稳，各行各业按下“重启”键。中南大学自动化学院教授、中国工程院院士桂卫华心中的大石头逐渐落了地。几个月来，他所关心的一家有色金属冶炼智能工厂在疫情期间没有传来停工停产的消息。

“没有消息就是好消息。”桂卫华认为，这意味着他们研发的冶金自动化关键技术稳定可靠。

从2014年到2019年，在国家自然科学基金创新研究群体项目（以下简称创新研究群体项目）支持下，桂卫华作为学术带头人，围绕复杂有色冶金过程控制理论、技术与应用开展研究。他们以人工智能为抓手，给有色冶金过程加点“智慧”，助力有色金属工业转型升级，以期实现绿色高效生产。

## 制造业升级的关键在“知识自动化”

《中国科学报》：随着人工智能深入推进和发展，制造过程中深度融入人工智能应当是大势所趋，目前面临哪些挑战？

桂卫华：人工智能与制造过程深度融合过程中，还存在相当大的挑战。这一挑战来源于人工智能研究与制造过程结合不足。一方面，在现代企业生产过程中，通过生产分工和自动化技术，体力型工作已经被机器所替代。未来，如果知识型的工作也能够通过自动化技术由机器完成，将极大地创造出更多新价值和新知识。

另一方面，由于工业企业需要面对市场需求、资源供应、环保排放等诸多因素，工况变化更加复杂；同时，随着云平台、移动计算、物联网、大数据的出现，工业环境中数据种类和规模迅速增加。客观形势变化令传统的知识型工作者感到力不从心。

为此，我们提出了“知识自动化”这一概念，指采用有效方法对知识进行合理提取及处理。摆脱对知识型工作者的传统依赖，实现具有智能的知识自动化系统是解决工业生产高效化、绿色化发展的核心，也是人工智能与制

### 自动化科学的“闭环”

改革开放以来，我国作为制造大国，有色金属产量和消费量连续16年位居世界第一。但是，与工业发达国家相比，我国在能耗利用、环境污染防治和“物”回收率等方面都存在较大的差距，主要原因之一是我国有色冶金自动化水平低。

在几十年的科研生涯里，桂卫华对此深有体会。作为有色冶金企业的常客，如今站在自动化程度颇高的智能工厂里，他不禁回想起曾在铝业当电工的岁月：“环境很糟糕，生产效率很低。”

这段艰苦的切身经历促使他一直在思考，工业生产中如何实现设备实现自动化，减少人为

操作带来的质量不稳定、效率不高等问题，从而让生产过程最大限度地节约能源、降低能耗物耗，最终实现绿色高效生产。

“自动化学科的最大特点便是与工业生产紧密结合。”桂卫华告诉《中国科学报》，“做自动化科学与技术研究，必须深入了解工艺流程和生产过程的实际需求。”

2014年，桂卫华带领的团队获得创新研究群体项目资助，为他们在自动化理论上取得进一步突破注入了强心剂。2017年，团队获得第二期延续资助。

多年来，他们总结出自动化科学的完整“闭环”：“在工业生产中挖掘发现关键技术难题，提

点实现知识驱动的自动化决策。

《中国科学报》：具体而言，知识自动化的学术研究分为哪些方面？针对工业生产过程，需要学者们从哪些方面去重点攻关？

桂卫华：目前的知识自动化研究，距离实现工业生产所需要的知识型工作自动化还存在很大差距，也是制造业未来转型升级的关键。

知识处理方面的研究集中在知识获取、表示、重组和关联推理等四个方向上。其中，知识获取方面，工业过程中隐性知识如何获取依然是研究难点，工业过程控制系统中建模、控制与优化决策相关知识规则的获取等仍是主要难题。

知识表示方面，工业生产过程中，知识型工作者对事物和信息的表达往往是模糊、不精确、不确定和模糊的，此类知识如何表示对于面向控制需求的知识自动化系统实现具有挑战性。

知识重组方面的研究还处在理论阶段，有关知识重组的应用研究相对比较少。

知识关联和推理方面，针对复杂对象，特别是复杂生产过程不完备知识的推理和计算仍停留在理论探讨层面，研究成果极少。

希望广大自动化、人工智能领域的学者，围绕这些问题开展集中研究，以解工业生产一线的燃眉之急。



桂卫华院士（前排中）和学生们讨论科研工作 课题组供图

炼科学问题、解决科学问题，最后创造性地提出有效解决方案。”桂卫华强调，“最重要的是最后能够落地，切实给工业生产带来变化，为国民经济发展添薪续力。”

### “千锤百炼”促可持续发展

从生产中来、到生产中去，在创新研究群体项目支持下，科研人员直面国家产业发展重大需求。

有色金属在我国国民经济、军工等方面地位特殊，属国家重要的战略资源。这些年来，桂卫华带领团队跑遍全国，在大大小小的有色金属生产企业里“千锤百炼”，着力自主创新，建立适用于我国有色冶金过程特点的智能优化制造关键技术，并进行工程应用研究，促进我国有色金属工业实现大幅节能降耗减排和可持续发展。

例如，针对铝电解生产环境恶劣，电解槽内多相多场耦合强烈、工况多变、控制困难造成生产能耗高、污染严重的问题，团队提出了基于多相—多场耦合仿真的大型铝电解槽结构、工艺与控制综合优化方法，解决了大型铝电解槽在低电压下的高效节能难题，形成了具有自主知识产权的大型铝电解槽低电压节能优化控制方法。

据了解，基于这一新技术开发的新一代全分布式铝电解槽节能控制系统，已应用到多家铝厂的多条生产线。相关成果获2014年度国家科技进步奖二等奖。

针对我国铝土矿的特点，围绕湿法炼锌工艺中的建模、优化与控制难点问题，团队研发了具有自主知识产权的浸出、净化、电解等主流程工序的优化控制技术，对提高湿法炼锌工艺的原料适应能力、降低生产过程中的能耗和物耗、提高有价金属的回收率发挥了重要的作用。研

究成果应用于我国锌冶炼的龙头企业——株洲冶炼集团，大幅降低锌粉消耗和吨锌电耗，为复杂资源条件下的锌冶炼稳定优化运行提供关键技术支撑。

### “求实”的向心力

桂卫华领衔的这一团队，是我国最早从事有色冶金自动化的研究团队。“老实做人，踏实做事”，是团队40年来沉淀的价值观。

这句话源自一份礼物。2003年前后，中南大学（中南大学前身）1978级全体研究生在入学30年之际计划给母校送一份礼物，桂卫华也是其中一员。

“我一直在想，我的老师、我的母校给予我最重要的东西是什么，我想到了‘求实’二字。”他说，这正是“老实做人，踏实做事”的高度概括。这个主意得到了同学们的认同，他们把“求实”二字刻在一块呈翻开书本状的石碑上，送给了母校。

多年来，“求实”也成为团队成员凝聚在一起不断前行的向心力。

团队成员、中南大学自动化学院教授蒋朝辉至今仍记得一件多年前发生的事。当时，在国家自然科学基金重大项目“大型高炉炼铁过程运行信息的高性能检测方法研究”的支持下，蒋朝辉带着团队在广西一家公司的高炉上测试监测炼铁过程运行信息的“内窥镜”。突然，一氧化碳爆表，蒋朝辉晕了过去。被抬下现场后，他坚持把这项工作做完了。回忆起这一幕，蒋朝辉说：“是一种使命感，让自己坚持下来。”

正是由于严谨治学的科研精神和求真务实的人生态度，一批有色冶金自动化领域高层次人才在团队中成长起来。“强调敬业和奉献，这是我们团队最大的宝藏。”桂卫华表示。