

3D 打印大飞机：81 岁院士的“新长征”

■本报记者 田瑞颖

满是材料的桌子上，摆着一架 C919 飞机模型，旁边散落着几板胶囊药。为了节省通勤时间，81 岁的中国工程院院士卢秉恒住到了办公室隔壁。每天一早，妻子都会准时叮嘱他吃药，他的心脏里已经安装了 5 个支架。

卢秉恒是我国增材制造技术的奠基人与开拓者。多年来，为了加速将 3D 打印用于制造大飞机的机头、机尾、机身、机翼等大部段，开辟飞机制造的中国新赛道，他的工作强度一直没变，每年有 100 多天都在出差调研和走访。

就在受访前一天凌晨，卢秉恒刚从四川落地西安。他告诉《中国科学报》，“3D 打印大飞机”是自己目前最大的目标。在卢秉恒看来，“3D 打印大飞机”的技术路线，不仅服务国家重大需求，“还有望带动每年数千亿元产值的市场”。

作为第一个提出“3D 打印大飞机”技术路线的人，卢秉恒透露，目前已经完成前期技术论证，并启动了大型增材制造装备的研发设计。他希望通过 4 到 5 年时间，完成专用装备设计、工艺研发和适航认证，最终实现工业化量产。

多次辗转，不忘航天梦

卢秉恒的航天梦，始于少年时代。1945 年，卢秉恒出生于安徽亳州的一座小县城。中学时期，他从报纸上看到钱学森归国研制火箭的报道，心潮澎湃，立志投身航天事业。由于特殊原因，他无法报考涉及保密的航天专业，最终进入合肥工业大学机械制造专业。

学非所愿，卢秉恒有些失意。好在他对数学很有热情，成绩也名列前茅。直到一次实习，他亲手开车床，看着刀具“削铁如泥”，才觉得“学机械，也还不错”。

大学毕业后，卢秉恒被分配到三门峡中原量仪厂做车床工人，每天 8 小时，一干就是 5 年多。后来他又担任分厂厂长，正式接触工程实际问题。虽然没能实现理想，但想到可以解决 100 多个工人的吃饭问题，他觉得也还算欣慰。

1979 年，我国正式恢复研究生招生。那年卢秉恒 34 岁，已是两个孩子的父亲。他决定放弃安稳的工作，报考西安交通大学(以下简称西交大)研究生。很多人劝他：“何必走这条路？”读研期间，厂领导前来探望，希望他毕业后回去接班。卢秉恒婉言谢绝了，因为他始终记得中学时那个梦想。

这一次，卢秉恒没有直接选择航天专业。离开校园十几年，他深知基础薄弱，决定先从机械制造工艺学起。他也感受到，重新拿起课本并不容易，前一刻还在与人交谈甚欢，翻开书十几分钟就睡着了。光是做到看书不犯困，他就用了半个多月。

导师顾崇銮教授的西迁精神和对工程实践



卢秉恒 受访者供图

的重视，影响了卢秉恒的一生。顾崇銮毕业于重庆中央大学机械工程系，后进入中央机械厂、中国兴业公司做工程实践。1945 年赴美留学的顾崇銮没有选择去大学拿学位，而是到企业当见习工程师，回国后又扎根工厂。60 多岁时，顾崇銮带领青年教师跑遍了 20 多个地市、几十家企业，从生产实例中选编了影响全国的教科书《机械制造工艺学》。

“我十分佩服他。”卢秉恒说。硕士毕业后，卢秉恒留校任教，同时攻读博士学位。他在读博期间解决了含黏性阻尼、黏弹阻尼的复杂结构的隔振设计问题，开发的程序被航天单位买走，用于保护发射仪器，后来还应用于航天医院。

取得博士学位时，卢秉恒已经 41 岁，他也成功与航天接轨。对于那段偏离梦想的人生岁月，他说：“历史的发展是曲折的，只能顺应社会的发展。但不能放弃，要不断积累本领。机会来了，就去争取。”

把国外设备“顶”下去

1992 年，卢秉恒前往美国密歇根大学做访问学者。在一家汽车公司参观时，他第一次看到 3D 打印设备，当时这项技术叫“快速成型”，能将三维数字模型直接转化为实体物件。当时，进口一台这样的设备需要 70 多万美元。

1993 年回国后，卢秉恒立刻转换研究方向，

带着 4 名博士生一头扎进实验室。“只要努力，中国人也能做出来。”

起步十分艰难。进口一箱光敏树脂要十几万美元，一套激光器也得十几万美元。开发一套设备至少需要 100 多万元，而卢秉恒手头只有其他项目剩下的几万块钱。

买不起，就自己做。他们联合兄弟院校花了 3 万元做出一台激光器；又与化工学院合作开发树脂，把每公斤成本从进口的 2000 元降到 100 元。软件开发、动态聚焦镜、聚光镜，都是他们亲手完成的，开机床、做试件更是常事。曾有工人看到卢秉恒加工的试件，惊叹“这水平绝对达到了五级工”。

那段时间，学生们也会私下嘀咕：“卢老师做的这个方向国内没人做，我们毕业了能找到工作吗？”

转机出现在 1995 年。一次先进制造技术大会上，专家报告结束后进入自由发言环节，卢秉恒“跳”了上去。介绍完技术，他最后说了一句：“这个技术很重要，希望能得到国家的支持。”

半个月后传来消息，考察组会尽快来校开展调研。卢秉恒兴奋不已，连夜赶制模型。考察组到来的那天，他们造出的样机已经具备扫描功能，还能打印出小方块。

250 万元的国家重点科技攻关项目资助，就这样落地了。“机会是给有准备的人的。”卢秉恒常说，“有多大条件就做多大事，然后找机会争取支持，把事做成。”

有了经费支持，他们当年就研制出我国第一台光固化树脂激光快速成型机原型机。1997 年，他们开发出我国第一台商品化光固化快速成型机，同年还创办了陕西恒通智能机器有限公司。

为了进一步降低成本，卢秉恒提出用紫外灯代替激光器，并研制出国际首创的紫外光快速成型机。该产品随后被认定为国家重点新产品，迅速在市场铺开，第一批客户就包括长安汽车和比亚迪。

当时，进口相关设备报价很高，日本报 48 万美元，美国报 72 万美元。卢秉恒的设备只要 150 万元人民币，不少国外企业前来谈合作。有家日本企业曾找上门，卢秉恒说合作可以，必须平等，“你在日本代理我的设备，我在中国代理你的”。对方悻悻而去。

之后，卢秉恒带领团队进一步实现了设备的全部国产化，并将价格一路降至三四十万元，把美国、日本的设备全部“顶”了下去。

2000 年，卢秉恒主持的“快速成型制造的若干关键技术及其设备”获得国家科学技术进步奖二等奖。此后，他们又推出了紫外光快速成型机、真空注塑机等 7 种型号 10 余个规格的设备，9 种型号的配套光敏树脂，形成了完整的快速成型装备体系。

2005 年，快速制造国家工程研究中心获批组建，卢秉恒担任主任。他们又研制出激光快速成型机、金属喷涂快速模具制造设备等装备，广泛应用于汽车制造、航空航天和生物医疗领域。

2019 年，国家增材制造创新中心(以下简称国家增材中心)在西安揭牌。这是 3D 打印领域唯一的国家级创新平台，由西安交大、北京航空航天大学、西北工业大学、清华大学、华中科技大学和 13 家企业共同组建，卢秉恒任国家增材中心主任。在他的带领下，国家增材中心相继研发出激光、电子束、离子束、电弧等驱动的 10 余项重大增材制造装备，申请国家专利 387 件，主持或参与制定行业标准 40 余项。

2020 年 5 月，长征五号 B 运载火箭搭载了卢秉恒团队与合作者研制的太空 3D 打印装备，实现了我国首次太空 3D 打印。这也是国际上第一次在太空中开展连续纤维复合材料 3D 打印实验。

向“3D 打印大飞机”挺进

卢秉恒的航天梦，仍在延续。

2022 年 9 月 29 日，C919 大型客机取得型号合格证，中国拥有了第一款可以投入航线运营的单通道干线客机。与此同时，卢秉恒也启动了“3D 打印大飞机”的研发计划。

“C919 虽然已经投入生产，但生产能力仍然严重不足，市场需求和制造能力之间还有很大差距，开辟基于 3D 打印的大飞机制造新路径具有重要意义。”卢秉恒告诉《中国科学报》。

虽然 C919 订单已超千架，但实际交付能力亟待提升。用增材制造打印大飞机，是卢秉恒给出的新技术路线，也是国际首创。他解释，这样做，一方面可以显著节约原材料成本，另一方面也是因为增材制造具备优异的柔性化能力，能够快速适配不同机型的生产需求，在型号转换过程中无需大规模重构生产线，实现制造能力在不同平台间的无缝切换与高效复用。

此外，增材制造还能实现大型构件的一体化成型，大幅简化供应链体系。“目前，国际上制造一架大型客机通常需要整合 1000 多家供应商和上百个国家的配套资源。”在卢秉恒看来，提升大飞机关键部件的自主可控能力，对我国航空工业的战略安全具有至关重要的意义。

卢秉恒透露了具体路径：首先要融合多种工艺优势寻求最优方案；其次是系统研发匹配的成型工艺，保障构件制造质量与一致性；最后一环也是最关键的一环——推动整套技术体系通过适航认证。

对于这一新赛道，卢秉恒也听到过质疑，但他坚信：“新生事物应该允许不同意见，质疑会帮助我们吧把工作做得更完善。”

国家增材中心科研部部长王磊自 2009 年读博士时就跟随卢秉恒。提及对导师的印象，他脱口而出：“他是非常正直的人。”虽然还有企业家的身份，但卢秉恒开展技术攻关和产品研发，始终瞄准行业发展和国家重大需求，从不为短期利益所动。

把国家增材中心打造成增材制造领域的“黄埔军校”，是卢秉恒一直坚持的事。无论是谁来参观，还是外出分享在研的新技术、新产品，他都毫无保留。

如今，从卢秉恒团队走出的人才已遍布航空航天、装备制造、医疗等领域，不少人已成为教育界、科研院所、企业界的中坚力量。

为了加快推动“3D 打印大飞机”走进现实，卢秉恒比以往更拼了。整日奔波、搞宣传、谈合作、盯技术，本可以分担的事，他也是亲力亲为。“这是一个新兴事物，我得站在第一线。”卢秉恒说。

卢秉恒的心脏植入支架已有 20 年，2021 年植入第 5 个。妻子放心不下他的身体，每次出差都陪在身边，看着他按时吃药。“他希望能为国家做成这件事。”妻子说。

“累吗？”很多人都问过他同样的问题。“累。”卢秉恒坦言。但他心中始终有一个信条，那是读初中时，他在马克思所著《资本论》中看到的一句话：“在科学上没有平坦的大道，只有不畏劳苦沿着陡峭山路攀登的人，才有希望达到光辉的顶点。”

资讯

千万级块体非晶合金攻关项目启动

本报讯(记者朱汉斌)7 月 31 日,Dowell 系列块体非晶合金新材料发布会暨千万级块体非晶合金横向攻关项目启动仪式在中国科学院东莞材料科学与技术研究所(以下简称东莞材料所)举行。这是继 7 月 1 日“块体非晶合金产学研用创新联合体”成立后的又一关键推进会议。

会上，东莞材料所与东莞非晶科技有限公司(以下简称非晶科技)完成新一轮战略合作签约。首期由非晶科技投入 1000 万元，双方将围绕块体非晶新材料展开全方位合作，共享技术研发、产线装备及全球市场资源，重点在成分设计、工艺优化与量产应用等环节联合攻关，构建自主知识产权体系，打造产学研用协同示范。

据介绍,Dowell 系列依托人工智能材料智能筛选模型，结合产业化试错经验，显著缩短研发周期，后续将持续优化成本控制、成型性能与服役稳定性，着力解决当前行业在工艺端的关键痛点。此次所企联合攻关项目的启动，是国内液态金属领域产学研深度融合的实践。双方将以此为契机，在攻克关键技术的同时，联合培养科技产业领军人才、科技管理骨干及卓越工程师，为液态金属产业高质量发展提供坚实人才支撑。

1155 万元！小麦新品种完成转化

本报讯(记者李媛)近日，在西北农林科技大学科技创新与产业创新深度融合发展大会上，西北农林科技大学与陕西西业发展集团签署小麦新品种西农 1155 植物品种权交易合同，西农 1155 成功以 1155 万元完成转化，刷新该校小麦品种转化价格纪录。

西农 1155 是西北农林科技大学农学院教授李学军团队历经 15 年选育的抗病、高产品种，于 2025 年 7 月通过国家审定。

该品种以丰德存麦 1 号为母本、诱变材料 03011 为父本配组选育而成。自 2019 年进入国家试验以来，持续展现矮秆优势，综合抗病、抗倒伏能力突出，田间群体整齐度高、成穗量大，在河南新乡、江苏盐城等地示范种植，超 60 万穗示范田未发生倒伏，田间长相优异。

病害抗性方面，西农 1155 对条锈病、纹枯病、赤霉病具备中等抗性，病害高发年份需重点防范白粉病与叶锈病。综合多年多点试验数据，该品种高产稳产、矮秆抗倒，综合抗性优良，具有广阔产业化推广前景。

从鱼基因组里“钓”出的抗癌希望

■本报记者 李晨 通讯员 王一凡

癌症治疗，往往意味着让一个家庭倾尽所有。即便近年来出现了一些有望“治愈”肿瘤的药物，但动辄上百万元的天价，还是让绝大多数患者望而却步。

历时近 20 年攻关，扬州大学动物科学与技术学院教授宋成义团队成功从鱼基因组内挖掘出两个高活性 DNA 转座子(命名为 PS 与 ZB)，一举打破国外在 CAR-T(嵌合抗原受体 T 细胞)肿瘤免疫疗法中基因递送工具领域的技术垄断，为我国发展自主、可控、安全的基因治疗技术提供了核心工具支撑。

近日，该技术以 1000 万元转让给上海细胞治疗集团。基于此开发的新型 CAR-T 肿瘤免疫疗法，有望使治疗费用从上百万元降至 20 万元以下，实现“让更多人用得起救命药”。

鱼类基因组里的免疫疗法核心工具

随着生物医药产业的快速迭代升级，CAR-T 肿瘤免疫疗法逐步走向临床。作为目前少数可实现肿瘤临床治愈的前沿技术，它在难治、复发血液肿瘤治疗中展现出颠覆性疗效，国内临床治疗需求也由此迎来爆发式增长。

宋成义告诉《中国科学报》，在 CAR-T 疗法的研发与临床应用体系中，基因递送工具是一项关键底层技术，直接决定疗法的研发落地、治疗效果与产业化成本。然而，这一核心工具长期被国外垄断。

“国内一些细胞治疗企业即便看好 CAR-T 疗法的广阔前景，也会因为缺失底层核心技术而处处受制于人，只能支付高昂的专利费开展相关研究与临床应用。”宋成义表示，这一现状大幅推高了单次治疗的国内成本，既让患者难以用上平价救命药，也制约了国内细胞治疗产业的自主发展。

在各类基因递送工具中，转座子不仅广泛存在于从细菌到人类的各类生物中，更因其结构简单、无病原性、成本可控，成为理想的非病毒基因递送工具候选者，是基因治疗中极具潜力的核心载体。

能否驯化这种天然的“搬运工”，让它精准携带治疗性基因进入目标细胞？“天然优质高活性转座子的筛选难度极高。因为经过漫长的生物进化，自然界绝大多数转座子早已被宿主静默、丧失活性。”宋成义坦言，想要获得可用的基因递送工具，必须从海量生物基因组中筛选出存活至今、活性稳定的转座子“幸存者”，再反复

验证其工作效率与生物安全性。找到“年轻”高活力的转座子，成为打破这一技术僵局的关键。这也是团队近 20 年来坚守的核心研究课题。

“哺乳动物与人类亲缘关系过近，自身防御系统会主动沉默体内转座子；细菌等生物进化距离过远，其转座子功能不完善，无法适配人体细胞运作。”团队核心成员、扬州大学动物科学与技术学院教授高波告诉《中国科学报》，他们发现，鱼类与人类的进化距离适中，基因组中留存大量未被静默的年轻转座子。它们在鱼类体内的高活性特质，大概率能在人体细胞中延续，是最优的筛选研究对象。

打通从试验到临床“最后一公里”

锁定方向后，团队耗费数年时间搭建起一套高效的筛选流程，通过生物信息学方法从鱼类基因组中预测出高活性转座子，再经过多轮哺乳动物细胞活性验证、功能筛选，层层剔除无效、低效样本。历经无数次试验迭代，他们最终从三刺鱼和斑马鱼基因组中，成功筛选鉴定出 PS、ZB 两个高活性 DNA 转座子。

目前，PS 与 ZB 转座子均已获得国家授权发明专利。相关研究成果发表于国际期刊《核酸研究》。

不过，精准筛选出优质高活性转座子，只是技术攻关的第一步。为了让国产技术真正比肩国际、实现弯道超越，团队对它们进行了“升级打磨”。经过工程化改造后，两款转座子综合性能可对标国际主流产品，部分核心指标甚至实现了超越。

高波介绍，PS 转座子结构极其简洁，是目前已知结构最简单的转座子之一，这意味着它更易于操作且细胞毒性低。相较于国外结构复杂、操作门槛高的同类产品，PS 转座子大幅降低了实验研发与工业制备的操作难度，同时有效提升细胞使用安全性。

而 ZB 转座子更是具备国外产品不具备的独特优势，表现出独特的基因传递优势。它会“聪明”地选择落脚点，把外源基因送到基因组中的“安全港”，安全性好且表达稳定，更易发挥治疗作用。

“实验室的科研成果如果止步于论文和专利，就无法落地应用。”为了打破国外垄断，回应国内企业的迫切需求，宋成义主动推动技术产

业化落地。2021 年，上海细胞治疗集团关注到该成果，主动抛出了成果转化的“橄榄枝”，双方正式开启对接合作。

让平价药“飞入寻常百姓家”

然而，实验室里表现优异的试验数据，能否平稳复刻到规模化工业生产当中，保持稳定、可靠的产出效果？这套技术能否在制备效率、使用成本上比肩甚至超越进口产品，真正实现国产替代？

为解决这些问题，宋成义团队与上海细胞治疗集团开展了为期一年多的联合攻关。双方通过反复试验比对、海量数据复盘、生产工艺打磨，全方位验证了 PS、ZB 转座子的量产稳定性、临床安全性与成本优势。最终，双方达成合作，完成 1000 万元技术转让，实现了从基础研究到产业应用的关键一跃。

“对我们来说，完成千万级的成果转化只是技术走向市场的起点，能持续迭代、真正惠及患者才是科研的最终价值。”宋成义说。

从实验室里的技术，到可以工业化量产、高效稳定的新工艺，规模化量产适配难题是技术落地的最大阻碍。

“实验室体系体量小、反应条件精细可控，转座递送效果表现亮眼。而一旦放大到规模化细胞生产体系，极易出现基因递送效率下滑、细胞存活率下降、基因阳性改造率波动等问题，难以符合细胞治疗药物标准化生产要求。”上海细胞治疗集团董事长钱其军表示。

为突破这一瓶颈，校企双方组建联合攻关团队，对 PS 转座子系统进一步升级改造，使其转座活性在原有基础上提高 5 倍，在高效 PS 转座子系统(重新命名为吉量，JL)加持下，最终成功开发出“闪 CAR-T”快速制备工艺。

“传统 CAR-T 制备需要分离、改造、扩增患者自身的 T 细胞，整个过程通常需 14 天左右。而基于我们新型 JL 转座子开发的‘闪



宋成义操作显微镜指导学生做斑马鱼胚胎显微注射。 扬州大学供图

CAR-T’技术，最快可将制备时间缩短至惊人的 6 小时。这不仅大幅降低了患者在等待期间病情恶化的风险，而且制备出的细胞活性更高、临床疗效更优。”钱其军介绍。

临床初步数据进一步验证了技术的潜力。目前，已有 3 例晚期的难治复发弥漫大 B 淋巴瘤患者，在接受“闪 CAR-T”治疗后体内肿瘤完全消退，且治疗过程中未出现严重副作用。

这项技术带来的改变，远不止于疗效。由于新型转座子递送效率高、所需载体剂量低，加之制备工艺的简化，生产成本得以大幅下降。据此估算，CAR-T 疗法的单次治疗费用有望从市场价的百万元左右降至 20 万元以下，让更多普通家庭看到了切实的希望。

尽管技术应用取得了突破性进展，团队对挑战仍保持着清醒的认知。宋成义指出，当前转座子递送基因的整合位置仍具随机性，团队已将研究重心转向攻关“精准递送”技术，旨在提升转座子的靶向性与安全性，推动这项惠民技术向临床安全应用迈出更稳健的一步。

“我们的长期目标是让 CAR-T 这类前沿的细胞治疗，从一项‘天价’技术转变为更多患者能够接受的临床选择，为提升重大疾病的治疗可及性与健康公平贡献力量。”宋成义说。