

# 量体定制大飞机

## ——国产自动铺丝机诞生记

出奇“制”胜

◎本报记者 矫阳



图为机器人式自动铺丝机。受访单位供图

盛夏时节，万物繁茂。  
7月12日，北京。中国航空制造技术研究院（以下简称航空工业制造院）一个科研现场，大型复合材料自动铺放成型设备研制项目团队带头人冯长征正与技术人员一起，对即将交付的几台机器人式自动铺丝机，进行调试测验。  
自动铺丝机可量体定制新型大飞机，主要用于飞机大型、复杂复合材料构件的铺放制造，如飞机机身、尾锥等。  
2005年，航空工业制造院开启自主研发复合材料构件自动化成型装备之旅。2022年10月，航空工业制造院向航空主机厂交付新一代机器人式自动铺丝机。经验证，技术水平比肩世界先进，打破了这项技术长期受制于人的困境，实现了“材料+工艺+设备+软件”技术体系全链条贯通。

### 不能被自动铺丝技术与装备“卡脖子”

轻量化，是飞机先进性的重要标志之一。  
“自重越轻，有效载荷越多，机动性也越强。”冯长征说。飞机减重，离不开碳纤维复合材料。  
每根碳纤维直径约5微米，相当于一根头发丝的十二分之一。虽细，却十分“强壮”。用碳纤维制成的复合材料，强度是钛合金的两三倍、铝合金的4倍以上。  
采用碳纤维，飞机重量将减轻三成。  
自动铺丝机中的“丝”，即指碳纤维丝束。  
先进飞机，复合材料结构设计复杂，关键部件制造汇聚各种工艺。

在航空工业制造院项目总师孙年俊的记忆里，十几年前，用碳纤维复合材料造飞机部件，都是靠工人手工铺叠，遇到大型构件、复杂构件就犯难。

“一层一层铺叠，做成一个飞机构件形状。一层0.13毫米，一个飞机复合材料构件最厚要40毫米。”孙年俊说，手工铺叠低效、精度差、材料浪费大。

“20世纪七八十年代，欧美国家成功研发出复合材料自动铺放设备，从自动铺带机，再到自动铺丝机，新型飞机复合材料构件实现自动化生产。”孙年俊说。

作为新飞机量产的关键技术，自动铺丝机技术与装备一直被国外垄断并实行技术封锁。

不能被“卡脖子”！航空工业制造院技术人员下定决心，加快自主研发铺丝机。

“这是我们的使命。”航空工业制造院院长李志强说。

然而，面对这片几乎空白的领域，如何加快国产铺丝机自主研发？

### 14年，走出一条自主研发之路

自动铺丝技术是一块难啃的“硬骨头”。“这是一项综合技术，涉及材料、工艺、设备及软件，协同精准度误差不能

超过0.01毫米。”孙年俊说。  
本世纪初，国内企业曾陆续引进几套自动铺带机。“铺带机早于铺丝机，主要用于结构变化小的飞机零部件铺放。”冯长征说。

引进的设备，适用性并不好，稍有改动，就无法使用。后续维护不仅要支付高昂的费用，还要看国外专家的脸色。

自主创新是航空强国的必由之路。  
自2005年起，航空工业制造院技术人员从有限的资料着手，自主研发自动铺带机。

“整合设备数千个零部件，相互配合差之毫厘就是失败。我们反复对比、验算不同的材料、程序和工艺，不断进行相互适配的参数试验，终于在3年后造出了自己的工程样机，并陆续实现工程化应用。”冯长征说。

2009年，航空工业制造院又将目光瞄向自动铺丝机。因构件异形，铺放的丝束必须随时变形。“因此，丝束送进裁断、不等宽均匀铺放丝束，是研制自动铺丝机最大的难题。”孙年俊说。

“先找准粘合剂，即预浸料，将‘丝’粘在一起，制成1500米长的预浸丝束；在保证高速长距铺放时，按设计精准裁切，使不等宽的丝束不变形。”冯长征说。

风雨十载。2019年，技术人员相继攻克了“丝束送进裁断以及铺放的张力、温度、压力、精度”关键技术。

前后14年，他们成功走出一条自主研发之路。

### 3年，成功应用于飞机制造

2019年，为适应国产飞机量产的迫切需求，航空工业制造院大力实施管理创新，整合各专业课组，搭建起一支独立的铺丝机研发团队。

完成工程化应用，艰辛一如既往。  
已交付的铺丝机，在“丝束送进裁断”工序中，有一个关键工具——裁刀。

裁刀十分袖珍，长18毫米、宽8毫米、厚0.8毫米，大小约为小手指甲盖的一半。

为研发这把袖珍裁刀，团队技术骨干马志涛足足耗时两年。不同于一块平板，飞机大曲率异形构件，表面凹凸不平、薄厚不一。

“要达到设计要求，必须对高速铺放的预浸丝束设置

裁断程序，快速实行‘裁’或‘不裁’。”孙年俊说。  
这好比弹奏一支乐曲。同一时刻，按与不按哪个琴键，必须根据“乐谱”瞬间决断。  
铺放速度每分钟30米，同一时刻，毫秒级内，十几把裁刀要按各自的指令舞出自己的动作。裁慢、裁错、“藕断丝连”、不同步，跟不上铺放速度……哪个环节出问题，都会导致停机，造成铺放质量缺陷。难！  
选什么材质的刀？硬度多少合适？断的方式是裁、剪还是斩？动作响应多少毫秒？种种难题接踵而至。  
“针对一个难啃的骨头，我们进行的计算、试验常以数千次计。”马志涛说。

一次次失败，一次次重来。  
历经两年攻坚，匹配丝束裁切参数的裁刀最终研发成功。前面丝束裁断后，后续丝束重复送达精度达±2毫米。

一把袖珍裁刀，仅是研制铺丝机六大难题中的一关。  
“3年来，研发团队先后解决了铺丝设备位置失准、速度失恒、张力失稳、断丝失离（分而不离）、算法失灵等多个难题，终于让我们自主研发的高端自动铺丝机能够成功应用于飞机制造。”孙年俊说。

看着科研现场内即将交付的自动铺丝机，李志强信心满怀地说：“我们将持续提升航空制造装备技术，始终心系国之大事，实现更多高端装备自主化、国产化。”

◎本报记者 张晔  
通讯员 张凤华 张海鑫

## 看全球首创利器如何穿越天山

一山横亘界南北，万古奇雄塞大荒。横贯新疆东西的天山山脉雄伟绝美，却成为阻隔南北疆经济往来和人员流动的天险。

7月9日，科技日报记者跟随交通工程技术人员来到目前世界最长高速公路隧道——新疆乌尉高速公路天山胜利隧道，看到工程技术人员正驾驭着世界首创的“钢铁蛟龙”，克服恶劣的自然环境、复杂的地质条件，进行一场前所未有的“穿越天山”之旅。

过去，乌鲁木齐至尉犁的行车时间长达7小时，车辆要翻越连绵不绝的天山山脉。2019年，新疆乌尉高速公路获批开建，将一举打通南北疆交通运输屏障。作为乌尉高速的“咽喉”工程，天山胜利隧道建成后车辆穿越天山仅需20分钟左右。

但是，想要打通天山，施工难度极大，胜利隧道具有“一长、一多、二深、五高”的显著特点。“一长”是指隧道长；“一多”是指断裂带多；“二深”是指竖井深、隧道埋深；“五高”是指高地应力、高地震烈度、高寒、高海拔和高环保要求。面对恶劣的自然环境和复杂的地质状况，传统矿山法和单一敞开式硬岩掘进机（TBM）均难满足掘进要求。

为了应对挑战，制造，改进装备成了不二之选。

### 与岩石过招不惧“硬碰硬”

当天，记者走进位于巴音郭楞蒙古自治州和静县的天山胜利隧道出口端的中导洞内，一台庞大的掘进机的刀盘隆隆转动，操作手台紧盯控制屏上的一个个数据，根据山体岩石情况适时调整掘进机刀盘的转速。

随着山体中的岩石被一寸一寸地搅碎落下，施工人员随即展开支护、喷浆等一系列工序，巩固机器掘进成果。

“这就是我们自主研发的全球首创的新型压注式工法TBM——‘胜利号’。”中交天和机械设备制造有限公司（以下简称中交天和）天山胜利隧道项目经理康健介绍说，与“胜利号”相向而行的还有一台型号掘进机——“天山号”，这俩既能“啃”下坚硬的岩石，也能在破碎带、软弱岩层中自如穿行。

“打通天山胜利隧道要面对大断层破碎带、软岩大变形、岩爆、突涌水、高地应力等世界性难题。在软弱岩层等较差地质条件下，传统设备将无法掘进，采用人工喷注混凝土支护的方法，安全性差、效率低，不能满足快速掘进的要求。”中交天和总工程师周骏说。

针对诸多难题，科研人员首次提出压注混凝土工法理念，并将敞开式TBM与压注混凝土工法进行创新性融合，研制出具备两种掘进、三种支护模式的TBM，以应对复杂多变的地质环境。

据中交天和设计研发总院院长靳党鹏介绍，“天山号”和“胜利号”开挖直径8.43米、全长282米、重约2000吨，国产化率在98%以上，已获发明专利、实用新型专利合计20余项。

开工以来，“胜利号”日掘进长度最高达35米、月掘进长度最高达528米，创造了大直径TBM在高寒、高海拔、高地应力环境的掘进新纪录；“天山号”战胜坍塌、突涌水等世界性难题，在涌水多、断裂带核心区日涌水量达1万立方米的情况下，安全穿越最大断层——F6断层（博阿断裂带），解决了隧道开挖的最大拦路虎。目前两台掘进机已完成18145米的隧道掘进任务，超过中导洞总长的83%，现正以日均30米的速度快速掘进。

### “横机竖打”向下突破天山之险

离开出口端中导洞，记者驱车继续向天山之巅行进。在海拔3660米处，还有一台TBM以垂直施工的方式，从地面向下突破天山之险。

天山胜利隧道采用“三洞+四竖井”施工法，可显著缩短隧道施工时间。其中，2号竖井工程是其重要组成部分，竖井深达707米，是目前世界上最深的高速公路竖井，也是世界首个一次开挖成型的超大直径硬岩大深度竖井。

“这里海拔高、气温低、气候极其恶劣，尤其是冬季，平均风速为7—8级，最低气温为零下40摄氏度，甚至‘呵气成冰’。”康健告诉记者，此地岩石强度超200兆帕，设备作业效率仅为平原地区的60%。

因地质状况复杂且建设标准高，中交天和在世界范围内首次将TBM破岩石工艺与传统钻进工艺完美结合，成功研制世界首创的高寒、高海拔、大深度、超大直径硬岩竖井掘进机——“首创号”，相当于让TBM竖着挖。

该掘进机刀盘直径为11.4米，装机功率为4500千瓦，整机高度为44米，重达1350吨。零部件完全国产化，并应用了全智能化掘进技术。

过去，大直径竖井多采用分级扩挖技术，“首创号”则采用掘进、排渣、支护相结合的全新钻井工艺，避免了传统钻爆法扰动岩石，实现了井内掘进无人化作业；配置自主研发的垂直导向系统，垂直精度控制在2毫米内；碎石经泥水循环系统排出，避免了排渣扬尘等对天山生态环境造成污染。目前，“首创号”已获发明专利、实用新型专利25项。

### 将数据“孤岛”变为数据集合

如今，借助树根互联“透明工厂”解决方案，三一重工18号工厂这一亚洲最大的智能化制造车间，已实现了设备、能耗和三电的全部透明化。企业通过掌握“人、机、料、法、环”全要素数据，得以科学降低能耗成本、提高设备使用率，让车间更“智慧”、生产更安全。

“我们所打造的‘透明工厂’，会根据工业4.0成熟度模型里对智能工厂的建设路径，结合合作方的实际需求，通过‘根云—工业连接’产品，采集工业数据至根云工业互联网平台，实现设备数据透明化、三电数据透明化、能源数据透明化，帮助工厂将零散的、不可见的生产运营数据‘孤岛’变为统一的、透明的工业数据集合，提高设备的高可用性，改善不安全行为和违规行为，改善能源管理现状，最终保证工厂生产的连续性，帮助合作方实现数字化转型和智能制造，摆脱管理困境。”贺东东说。

从内部到外部，从工厂到工地，从装货到产品，三一重工“透明化”正在向外延伸。基于全要素连接，三一重工率先在行业内建立企业控制中心ECC，依托树根互



图为“胜利号”用压注工法掘进成型的山体隧道。受访单位供图

## “透明工厂”让生产品质看得见

◎本报记者 叶青

在湖南长沙的三一重工股份有限公司（以下简称三一重工）里，一台焊接机器人刚刚垂下焊枪，远在600公里外的树根互联股份有限公司（以下简称树根互联）广州展厅的大屏幕上，各项指标实时呈现。

“在这块大屏幕上，我们可以看到三一重工全国不同工厂、不同生产线上人和设备的实时工作状态，包括工厂下料分拣、焊接、机械加工等不同工艺段，做到了‘人、机、料、法、环（即人员、机器、原料、方法、环境）’全要素透明，我们称之为‘透明工厂’。”树根互联联合创始人、CEO贺东东指着屏幕说，在工业4.0时代，“透明工厂”作为一

种智能制造新模式，是数字化时代智能工厂的新版本，也是商业文明进化的新实践。

### 数字孪生让设备更“聪明”

为何要打造“透明工厂”？

“透明化的本质在于通过建立实时、准确、全面的数据透明化管理平台，来实现数字化精益管理。对众多制造业企业来说，及时了解和创建‘透明工厂’，是企业数字化进程中最为重要的命题之一。因此，我们帮助企业打造‘透明工厂’，满足广大企业的切实需求。”贺东东说。

树根互联“透明工厂”解决方案，是以根云平台三大核心通用能力为支撑，包括多种工业设备的大规模连接能力、多源

工业大数据和AI分析能力、多样化工业应用的开发和协同能力等，并以全面数据透明化为核心，以基于IoT（物联网）数据计算的设备指标为抓手，通过设备驾驶舱支撑管理层进行科学决策。

以三一重工的“透明工厂”为例，该工厂通过“根云—工业连接”产品，采集了设备的运行数据，看清了设备真正的运行状态——看似已经饱和的生产线，实际上有大量的待机和生产等待时间。

“我们为每台设备打造数字孪生，在系统上可以看到它的编号、当前任务、负责人、物料、已完成工作量、耐久状态等信息，通过在三维坐标轴内的观察，能够得出机器人的工程状态、利用率等分析信息。”贺东东介绍，“这样既支持了生产管理人员进行精益生产，又支持了设备管理人员进行高效的现场维护，完成了管理的看、管、控三位一体的智能化解决方案。”

### 工厂全要素透明化

树根互联打造的“透明工厂”，最大特点是连接现场“人、机、料、法、环”等各项数据，打通已有信息化系统，对数据进行整合、治理，实现全方位数据透明、精益管理和智能制造。

利用这套系统，三一重工实现生产安全智能化管理。全集团2万多个摄像头回传的数据信号，经过AI分析，可以自动比对现场有无物料随意堆放，工人是否佩戴安全帽、是否在工作长时间玩手机等，保证了作业现场的整洁、高效、安全。

从内部到外部，从工厂到工地，从装货到产品，三一重工“透明化”正在向外延伸。基于全要素连接，三一重工率先在行业内建立企业控制中心ECC，依托树根互



三一重工股份有限公司18号工厂依托根云工业互联网操作系统实现生产全要素透明化。受访单位供图