

科技自立自强之路



中国科学院金属研究所(以下简称金属所)研究员李殿中永远忘不了2020年的一天,当他走进某国内盾构机制造企业的仓库时,眼前的一切让他震撼不已。
“盾构机制造是一项长期工作,本不需要储备过多组件,但这间仓库里却放着十几套盾构机主轴承,总价值达上亿元。”李殿中说。
彼时,我国已进入轨道交通基础设施建设高

峰期。作为凿山开路、过江跨海工程项目的利器,大型盾构机已实现大部分部件的国产化,但最关键的部件——主轴承却长期依赖进口。
如果将大型盾构机比作一个人,那么主轴承的作用堪比心脏。当“心脏”被攥在别人手心时,盾构机制造企业所承受的压力以及我国基础设施建设面临的潜在风险可想而知。于是,为了规避可能的“断供”,很多企业只能不惜成本囤积大量主轴承。

“我们有责任给国产大型盾构机装上一颗‘中国心’。”李殿中暗下决心。
2022年12月15日,金属所宣布,李殿中和该所研究员、中国科学院院士李依依,该所研究员胡小强带领团队,联合国内其他研究机构和企业,成功研制出超大型盾构机用直径8米主轴承。我国大型盾构机国产化自主可控链条由此顺利打通。

3 1.5微米的“天堑”

2020年“五一”假期前一天,一架从沈阳飞往广州的客机即将落地。胡小强和几位同事充满期待地看着舷窗外繁华的都市。
他们此行的目的地是广州贝岗的一处基地。那里有一台主轴承直径6.3米的盾构机,由于超出设计使用里程,需要接受专家评估。得知消息的他们马上赶过去,全程参与了对盾构机主轴承的测评和分析,并详细了解主轴承的每一处细节。
在承接先导专项任务之前,金属所的科研人员并没有设计盾构机主轴承的太多经验。“正因如此,我们不会放弃任何一次学习和调研的机会。”胡小强说。
即便这样,想要单打独斗完成这项工作也不现实。

凭借前述自主开发的“双低氧稀土钢”关键技术,科研人员已经实现了对主轴承大型套圈和大型滚子“洁净、均质”的制备,并获得强韧性、抗疲劳性和耐磨性等综合性能较好的钢材,这为大型主轴承的研制打下了很好的基础。至于主轴承的设计问题,则可以一点一点摸索、学习。但李殿中坦言,他们还要面对另一个难题——轴承加工精度不过关。这个难题不是单靠研究人员的努力就能解决的。
当时,我国进口设备由于受国外技术限制,大型滚子的加工精度只能达到二级,即几百个滚子直径的误差不大于正负2.5微米,但要制造出符合盾构机要求的滚子,加工精度必须达到一级,即柱体直径误差不大于正负1微米,两者之间1.5微米的差距,虽然仅相当于一根头发丝直径的1/40,但在科研团队的眼中无异于一道“天堑”。
要跨过这道“天堑”,只能联合企业一同攻关。
直到现在,谈及与企业的合作,胡小强言语中仍有些激动。据他回忆,意识

到问题后,他们便主动联合相关企业一起讨论、建模,从基本原理到方法,再到具体实践。“我们提需求,相关企业一起攻关。一边干一边解决随时出现的问题。”
与金属所合作进行滚子加工的是辽宁省内一家主要从事风力电机滚子加工的企业。此前,该企业从未加工过直径这么大、精度这么高的滚子。合作之初,几乎每次技术升级尝试都宣告失败。
“那段时间,每个人都承受着巨大的压力,以至于合作企业的现场负责人开始怀疑,他们采用自主开发的工艺和生产线是否能实现如此高精度等级的加工。”胡小强回忆道。
然而,经过反复论证和计算,科研团队坚信他们的精度要求是可以达到的,企业也选择相信他们的判断,并严格按照给定的工艺要求,一步步严格推进。
当完全符合要求的滚子被加工出来,企业负责人通过电话向胡小强报喜时,那种激动与自豪的语气令胡小强记忆犹新。
由此,中国企业彻底掌握了大型滚子的一级精度加工技术,并一举达到国际先进水平。

为了让盾构机拥有一颗「中国心」

- ① 2021年11月,装有自研直径3米级主轴承的盾构机下线仪式举行。
- ② 自研超大型盾构机用直径8米级主轴承。
- ③ 自研直径8米级主轴承验收会。

1 几代人接力攻克“稀土钢”

盾构机全盾构隧道掘进机,是一种隧道掘进的专用工程机械,其主轴承是刀盘驱动系统的关键核心部件。盾构机在掘进过程中,主轴承“手持”刀盘旋转,切削掌子面并为刀盘提供旋转支撑。
“直径8米的主轴承在运转过程中,承载的最大轴力可达1亿牛顿,相当于2500头成年亚洲象的体重。”胡小强介绍,大型盾构机在掘进时只能前进不能倒退,主轴承一旦失效,会造成严重损失。主轴承的国产化自然而然成为必须攻克的“卡脖子”难题。
然而,这个问题出现在李殿中和同事们视野中的时间并不长。至少在2019年之前,他们更关注的是另一个“老大难”问题——研发“稀土钢”。
所谓稀土钢,简单地说,便是在钢材制造过程中加入一定比例的稀土元素,从而改变钢材的某些特性。这看似容易,实则困难重重。
稀土被称为工业的“维生素”,大量研究表明,添加微量稀土就能显著提高钢材的韧性、耐磨性、耐热性、耐蚀性等。正因如此,稀土添加过程中的微小变化或掺杂杂质,都会引发很多不可测的问题。

“在稀土钢的研发过程中,有两个始终绕不过去的难题。”胡小强说,一是钢材在添加稀土后,性能往往会剧烈波动,存在稳定性不好的问题;二是很多大型关键零部件的材料制备不能在实验室完成,很难保证稀土在大工业环境下稳定发挥作用。
为了解决上述问题,自20世纪50年代起,金属所几代科研人员接力攻关,就稀土元素对钢材的影响进行了深入研究。直到2007年,在进行一项针对厚大断面大型钢锭的科研攻关项目时,金属所科研团队偶然发现稀土钢性能波动问题的根源可能在于稀土元素自身的氧杂质,而非传统认为的钢材内部杂质。
由此,科研团队顺藤摸瓜,经过大量实验、计算和表征,最终揭示了稀土在钢中的主要作用机制,并开发出一套“双低氧稀土钢”关键技术。采用该技术研制出的稀土钢的拉压疲劳寿命延长40多倍,滚动接触非疲劳寿命提升40%。
由此,稀土钢的问题被彻底解决了。而彼时沉浸在喜悦中的科研人员还不知道,眼前的成绩不仅是他们过去几十年努力的硕果,更将是未来开展大型盾构机主轴承攻关的重要基石。

■ 本报记者 陈彬

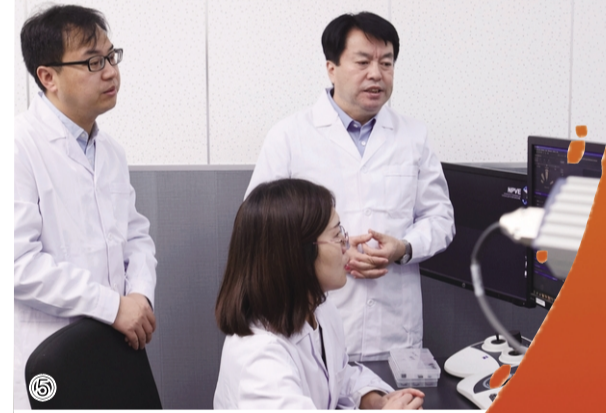
2 “国家队”需要站出来

彼时,正值中国科学院组织实施战略性先导科技专项。伴随着专项的实施,一项历史性使命落到了金属所科研人员身上。
先导专项是中国科学院瞄准事关我国全局和长远发展的重大科技问题提出的一项战略规划行动。自2019年开始,金属所希望依托自身在稀土钢方面的长期积累,凝练、提出和承担一项与此相关的先导专项,并为此开展了广泛的实地调研。
“最初,我们并没有将研发重点放在大型盾构机的主轴承上。”李殿中回忆说,直至2019年岁末年初,在调研了国内十几个省份的30余家单位后,他们才发现主轴承的国产化已是一个不容忽视的“卡脖子”难题。
我国引入首台盾构机是在1997年,并于本世纪初开始探索盾构机的国产化。至2019

年,盾构机的几乎所有部件均可以实现自给,唯独最关键的主轴承始终依赖国外进口。由此产生的问题,国内企业的感受最深刻。
在与胡小强等人交谈时,某盾构机制造企业领导算过一笔账,由于核心技术不在自己手中,从国外进口一套主轴承的价格往往超过千万元。不但价格昂贵,而且在正常情况下,盾构机主轴承的进口订货周期短则10个月,长则超过一年。但我国的很多基建项目,从立项到完工也不过三五年时间。
更重要的是,由于存在供货随时停止的风险,国内企业对依靠外国供货总有一种“不安全感”,最终转化为希望盾构机主轴承国产化的一致呼声。
但同时,对于使用国产设备,国内企业又存在矛盾心理——盾构机造价动辄几千万元,

其背后的基建工程花费更以亿元计,国产主轴承即便研制出来,使用风险有多大,谁的心里也没底。
胡小强总结了研发主轴承必须克服的三大困难——
其一,大型主轴承最大直径达8米,承载几万吨,但加工精度要达到微米级别,其技术难度可想而知。
其二,盾构机在施工过程中不能后退,主轴承一旦出现问题将无法更换,导致在实际应用场景中的试验风险特别高。
其三,大型主轴承的攻关链条特别长,涉及结构设计、材料制备、加工装配、测试评价和应用考核等诸多环节,关联到20多家单位,仅制造过程就有130多道工序。
李殿中认为,要克服以上困难,必须从基

础理论做起,向上整合各研发生产链,才能保证最终结果万无一失,“也正因如此,需要我们的‘国家队’站出来”。
说出这番话,金属所的科研团队是有底气的。他们发现,经过几代人接力攻关所解决的稀土钢制备问题,已经从理论和材料层面为大型主轴承的研发打下了坚实“地基”。他们接下来要做的是,在这片“地基”上盖起自立自强的“高楼大厦”。
2020年2月,中国科学院正式启动先导专项“高端轴承自主可控制造”。金属所整合所内轴承钢、热处理、陶瓷、保持架等12个团队,以及院内7家研究所的力量,组建了覆盖轴承研发、轴承材料、制造、评价与服役全生命周期的全链条科技团队。
一场新的“战役”就此打响。



④ 自研的直径8.01米主轴承通过评审并被正式命名为“破壁者”。
⑤ 胡小强(左)、李殿中(右)在实验室。
⑥ 李依依(右二)主持研讨工作。

4 未完成的挑战

耗时3年,经20多家科研机构和企业通力合作,主轴承材料制备、精密加工、成套设计中的12项关键技术问题先后被解决。最终,科研团队成功用1467.4吨稀土轴承钢研制出41支大型套圈、7996粒滚子、492吨铜钢复合保持架……陆续生产出直径3米级到8米级共10套4个型号的国产盾构机主轴承。
2021年11月,在沈阳市政府的支持下,装有自研直径3米主轴承的盾构机正式下线,并在沈阳地铁工程中成功应用。
2022年9月30日,超大型盾构机用直径8米级主轴承验收合格,标志着由金属所领衔的“高端轴承自主可控制造”先导专项任务圆满完成。
一天后的国庆假期,几乎3年没休过节假日的科研人员终于可以休息了。而胡小强回到家后的第二天,双眼便肿胀到完全看不见东西。
“把任务卸下来后,身体里积攒的‘火气’就涌出来了。”李殿中对胡小强“病因”的诊断并非完全戏谑之言。
李殿中总结,在攻克盾构机主轴承技术的过程中,金属所走通了一条从基础研究出发、组织建制化攻关、到攻克“卡脖子”难题的科技创新之路。
他介绍说,中国科学院对应用性强的战略性先导专项管理一般采取“行政指挥线”“技术指挥线”双线并行的模式。金属所领导班子经过深刻思考,从强化“高端轴承自主可控制造”专项管理的角度出发,在“双线”的基础上进一步建立“党委保障线”的三线并行机制。
“我们构建了‘院领导—业务局—研究所’三级高效协同的管理架构,上下贯通,党政联动,多方互动。”
胡小强清晰记得,2022年7月,项目已经进入“会战”阶段,从全国各地制造完成的零件陆续运抵河南洛阳,准备组装。就在这一关键节点,人们发现目前的机床设备出现了问题——用于给设备进行表面淬火的机床完全无法满足如此大直径轴承的使用要求,同样不具备使用要求的还有高精度磨床。
“事实上,当时国内生产的高精度磨床都无法满足要求,要进口的话,直径5米的磨床不但要价高达8000万元,而且制造周期要两年;至于直径8米的磨床,国外对我们完全禁售。”胡小强说。
这是一个几乎无法解决的难题,严重的挫败感笼罩在大家心头。金属所党委迅速作出决定,组建以首任所长李薰名字命名的“李薰大型重载轴承攻关突击队”。在突击队成立大会上,李依依深情讲述了李薰当年舍国外奋斗多年所得,冲破重重阻碍回到祖国,率领团队开展“两弹一星”关键材料攻关的感人事迹……
这份回忆感染、激励了突击队的每名成员。在其感召下,所有攻关人员群策群力、反复探索。现有机床不能满足要求,就联合各单位在现场一点点改造;买不到合适的磨床,就试着将大直径车床改造成磨床,取得一定参数后,联合磨床企业共同研发……
最终,问题被一点点解决,项目得以顺利推进。
如今,大型盾构机主轴承项目已经尘埃落定,当年的昂扬斗志已沉淀为科研人员脑中一段沉甸甸的回忆。但这并不代表所有任务都已完成,正如李殿中所言,“针对‘卡脖子’问题的科研只有落实到产业、只有构建完整的产业生态链,才能彻底解决问题”。
他表示,在大型盾构机主轴承项目上,技术层面的问题已经得到解决,但在产业层面还需要和产业界共同努力,持续发力。“目前,主轴承产业化基地正式落地,为打通盾构机国产化‘最后一公里’奠定了坚实基础。”
李殿中畅想着高端主轴承相关技术的进一步应用。他说:“我们可以把它应用到风电等新能源领域,当然还有疏浚、塔吊、港机,乃至一些高端精密医疗器械中。”
他们时刻准备着,迎接下一场关键技术的挑战。