



掘进，一路向前 ——中国盾构机走向世界始末

深瞳工作室出品

采写：本报记者 矫阳
策划：刘莉 李坤

11月7日，在中国中铁工程装备集团（以下简称中铁装备）郑州总装车间，已通过客户验收的“中铁912号”“中铁913号”盾构机正被加紧拆装，即将被发往新加坡。

此前不久，世界首台绿色盾构机“中铁1237号”从这里下线，它搭载了连续掘进技术、快速换模技术等，将出口意大利，被用于西西里岛高铁隧道建设。

这只是近年来我国盾构机大量出口的缩影。截至2023年，中国盾构机在全球市场占有率达70%。

1995年，我国首次引进德国盾构机。20多年来，自主创新的中国盾构机从蹒跚学步，到一路向前掘进，再到跨入世界先进行列，实现了完美逆袭。

钻爆与TBM，两个“拳头” 应对挑战

盾构机是目前最先进的隧道开挖装备，俗称“钢铁穿山甲”，集机、电、液、信息、人工智能等高新技术于一身，具有数千个零部件。盾构机分两种，一种用于软土软岩隧道，另一种用于硬岩隧道，又名TBM（硬岩掘进机）。

全世界的隧道工程，一半以上使用盾构机施工。中国工程院院士孙永福回忆说，初识隧道掘进机，源于上世纪五十年代的教科书。

上世纪五十年代，距盾构机掘进隧道原理的提出，已过去120余年。而中国工程技术人员对隧道施工的认知，仍停留于钻爆法。

用钻爆法施工，需要在掌子面钻孔、装炸药，然后点火、跑到角落躲好，起爆后，要迅速将支撑拱架和混凝土运至新开洞面进行支护，再用运输工具把破碎的岩石运出去。

钻爆法经济、适应性强，但掘进速度慢。直到现在，一条断面直径10米的隧道，采用钻爆法施工，平均月掘进仅100米。

还有没有更好的隧道施工法？18世纪末，法国工程师布鲁诺尔从船蛆钻洞现象中获得灵感，提出盾构机掘进隧道原理。船蛆是种蛤，头部有外壳，钻穿木板时，会分泌液体涂在孔壁上，形成坚韧的保护壳，抵抗木板潮湿后的膨胀，以防被压扁。

1825年，在伦敦泰晤士河下方，布鲁诺尔修建了世界第一条盾构机法隧道，随后盾构机被逐渐改进，并在欧洲得到广泛使用。

“盾构机工作原理，是用一个钢结构组件沿隧道轴线边向前推进边对土壤进行掘进。”中国中铁高级专家、原中铁装备党委书记、董事长李建斌解释说，钢结构组件的壳体称“盾壳”，对挖掘出、未衬砌的隧道段起临时支护作用，承受周围土层的土压、地下水压，并挡住地下水。

“盾”，即“保护”，指盾壳；“构”，即“构筑”，指管片拼装。一句话，即在盾壳的掩护下进行掘进、出渣、衬砌等作业。

依据地质条件，盾构机有土压、泥水平衡等类型；依据隧道大小，分不同直径。

上世纪八十年代，中国大地上，激荡着改革开放的春风。不断涌现的新技术，引起党中央、国务院的关注。中国铁路高层领导也在思考如何使铁路隧道施工赶上或接近世界水平。

1987年，时任铁道部副部长的孙永福，在考察由意大利公司承建的甘肃引大入秦水利工程时，看到国外掘进机月掘进高达1300米的速度，大为赞赏。

几年后，建设秦岭隧道时，对于是否引进世界上最先进的TBM，当时争议很大。

1993年9月，原铁道部在北京召开专家论证会。有专家认为，相比钻爆法，隧道掘进机造价太高；引进隧道掘进机，以后推广应用也很困难。在总结发言时，孙永福明确表示：“以往我们熟悉钻爆法，这只是一个拳头；今后如果掌握了TBM技术，我们就有两个拳头来应对挑战。”孙永福认为，在熟练掌握TBM技术后，可以提高效率，降低造价。

要提高中国铁路建设水平，必须吸收世界上的先进技术。经过充分科学论证，中国铁路高层做出重大决策，秦岭隧道引进TBM施工，同时主导选型设计。

盾构机是典型的非标准设计的特殊产品，需要量身定制。针对西康铁路秦岭隧道的需要，原铁道部组织设计、制造、施工方面的专家，确定了引进TBM的主要技术要求——单线电气化铁路，敞开区TBM刀盘直径8.8米，单价3.5亿元。

秦岭隧道，锻炼培养出一批 专家

1997年7月，全长256米的德国TBM运抵秦岭隧道，经安装调试后，投入使用。

“使用TBM修建秦岭隧道时，不论是对TBM的选型、设计、组装、调试、操作、掘进、诊断、维护，还是对不同地质条件下TBM穿越关键技术，大家都非常陌生。”中国工程院院士杜彦良回忆说。

对秦岭隧道TBM核心硬件和软件技术，德国维尔特公司禁止中方技术人员接近。这是因为，当时中国已研发出直径为4.35米、专门克服软土地基的泥水式土压平衡盾构机，以及国内第一台半断面插刀盾构机。

“他们把中国当作极具潜力的竞争对手，始终心怀戒备。”中铁装备总经理张志国说。

然而，作为推动引进TBM的决策者，孙永福目标十分清晰，那就是“我们引进TBM后，一定要尽快实现配件国产化，然后实现整机国产化”。

一场引进消化吸收再创新的攻坚战，在秦岭打响。为管好、用好这台世界最先进的TBM，原铁道部组织施工及有关科研单位和院校，共同开展科技攻关。

作为学术带头人，时任石家庄铁道学院工程机械系主任杜彦良组成科研团队，承担了原铁道部有关TBM掘进技术、监测诊断与维护保养技术、不良地质施工技术等一系列科研课题。仅翻译整理，杜彦良与科研团队就完成了1500万字的技术文件。

时任中铁十八局工程指挥长魏贤坤，在赴瑞士费尔区那隧道学习后，撰写出2万多字的《费尔区那隧道施工考察报告》，对秦岭隧道TBM施工起到了重要参考作用。

中铁隧道局组成了10人的科技攻关小组，平均年龄30岁。在TBM组装过程中，科技攻关小组多次排除各种复杂电气故障，修复各类电气元件。在掘进过程中，科技攻关小组针对厂家设计上的不合理问题，多次向德国专家提出修正意见，并被采纳。

直径432毫米的大推力盘形滚刀刀圈经常损坏，需要更换。我国科研单位联合攻关，采用一种低合金结构钢刀。经过运转试验，在磨损率和使用寿命方面，其与德国维尔特公司产品持平，但价格要低1/3。

一系列TBM施工技术及部分后配套零部件国产化等难题的攻克，使秦岭隧道掘进高歌猛进，创造了最高月掘进528米的纪录，平均掘进效率45%，远远超过国际40%的平均水平。

1999年9月6日，秦岭隧道贯通。

“秦岭隧道开创性的工作和科研成果，为我国后续其他TBM工程的实施奠定了重要的基础，锻炼培养了一批TBM专家、工程师和技术人员。”杜彦良说。

秦岭隧道成功引进TBM的实践，点燃了我国企业研发、制造和推广应用隧道掘进机的熊熊烈火。以中铁装备、中国铁建重工集团股份有限公司（以下简称铁建重工）和中交天和机械设备有限公司（以下简称中交天和）为代表的一大批具有竞争力的盾构机制造企业，陆续诞生。

造“国字号”，赶超“洋盾 构机”

用“洋盾构机”有甜头，但越往后问题越多。机器维修保养时不许中方参加，还拉警戒线；维修进度中方说了不算，完全取决于外方……

“图纸有问题！”一次，在加工进口盾构机一个简单拖车钢结构件时，中方指出了其中的错误。

外方设计人员开出天价服务条件，要求负责所有差旅食宿，每天咨询费600美元。

没有核心技术就没有话语权。2000年初，中铁隧道局做出超前的、具有重大意义的决定——造中国人自己的盾构机！

自2002年起，科技部连续将盾构机多个关键技术研发列入“863”计划。

为建设上海地铁2号线，上海市决定，采用自主研发盾构机。

机项目课题研究。

一台盾构机零部件超过2万个，单是控制系统就有2000多个控制点。

李建斌带领中铁隧道局项目团队，以“掌握设备设计理念，掌握核心技术，做自主研发”为目标，深入隧道现场，一根管子排查，一个个元器件核对。比较参数、核实数据、查阅资料，经常奋战到凌晨。

宝剑锋从磨砺出，梅花香自苦寒来。经过联合攻关，研发团队研究出了具有宽泛地质适应性盾构机刀盘、刀具合金钢的热处理方法、盾构机液压推进系统与刀盘液驱驱动系统的集成技术等，并展开示范性应用。

2004年10月，中国首台具有完全自主知识产权的地铁土压平衡盾构机——“先行号”样机，在上海地铁二号线西延伸段区间隧道始发掘进，打破了此前“洋盾构机”垄断地铁施工的局面，随后陆续应用于中国多个城市地铁项目建设。2006年，该产品被列入国家重点新产品，并荣获国家科学技术进步奖一等奖。

中国盾构人乘势而上，发力新领域。完成“先行号”关键技术研究后，在“863”计划支撑下，中铁隧道局与上海隧道工程股份有限公司再接再厉，又相继完成了砂砾复杂地层关键技术研究、复合式土压平衡及大直径泥水平衡盾构机的研制与应用。

2008年，中国盾构机成果再现。4月，我国自主研发的首台复合土压平衡盾构机横空出世，命名为“中国中铁1号”，并在天津地铁三号线施工项目成功应用；12月，上海打浦路复线隧道工地，一台直径为11.22米的国产大型泥水平衡盾构机“进越号”静待发力。

作为自主创新跨越发展的标志性成果，“进越号”成功入选“十一五”国家重大科技成就展。从此，中国步入了具备大直径泥水平衡盾构机自主设计、制造和施工技术的盾构大国行列。

2012年，“盾构机装备自主设计制造关键技术及产业化”科研项目，荣获国家科学技术进步奖一等奖。

创新步履从未停止。圆形盾构机，便于刀盘驱动统一，技术较成熟，而矩形盾构机，由于刀盘驱动统一协调难，尚没有较大直径的盾构机。李建斌团队经过一年多艰苦研发，攻克了异形盾构机刀盘驱动统一的难题，于2013年研制成功了当时世界上最大断面的矩形盾构机，并成功应用于郑州市中州大道下穿隧道工程。2018年度国家科学技术奖励大会上，由中铁装备牵头申报的“异形全断面隧道掘进机设计制造关键技术及应用”项目，荣获国家科学技术进步奖二等奖。

2012年，马来西亚为建设MRT（捷运线）项目，计划向欧洲公司采购10台盾构机。中铁装备获悉后，下决心借此机会，将中国盾构机推向马来西亚。

“无论怎么介绍，马来西亚主都无动于衷。”李建斌说，因为中国盾构没有一单海外应用的实例。

中铁装备没有放弃，他们将马来西亚业主邀请到中国实地参观。

2012年，马来西亚为建设MRT（捷运线）项目，计划向欧洲公司采购10台盾构机。中铁装备获悉后，下决心借此机会，将中国盾构机推向马来西亚。

“无论怎么介绍，马来西亚主都无动于衷。”李建斌说，因为中国盾构没有一单海外应用的实例。

“中国的盾构机发展速度令人惊奇！我们看到了中铁装备的制造能力，中铁装备制造的盾构，被广泛应用在中国知名大城市，性能非常好！”通过参观一个又一个成功案例，马来西亚业主被深深折服。

2012年，“中铁50号”出口马来西亚，成为中国盾构机走向海外第一单。通过针对性设计，提升设备性能，使马来西亚一条隧道的贯通提前了43天，创造了当地盾构施工纪录，由此奠定了中国造盾构机的海外声誉。

随后，中铁装备又敲开了以高标准著称的新加坡、意大利等30多个国家和地区的市场。

中国盾构人明白，只有不断提升技术水平，才能走得更远。

新加坡汤申东海岸线T221标段人行过街，需要矩形设计，中铁装备凭借自主研发的矩形盾构机，获得了这一订单。2017年3月27日，在新加坡第三届城市地下空间和隧道大会上，新加坡陆路交通局汤申东海岸线负责人在报告中，分享了中铁装备矩形盾构式顶管施工经验，对这一创新产品赞不绝口。

中国盾构机品种越来越多，功能更强大。超大直径，能转弯，会爬坡，耐极寒……这些“中国品牌”盾构机，正成为畅销海外的“新国货”。

2017年7月3日，碧空万里，艳阳高照，在铁建重工总部长沙，世界首台挑战极寒天气的盾构机“玛利亚号”下线。这是专为解决俄罗斯地区极寒条件下盾构施工而设计的。

上世纪五六十年代，苏联地铁专家帮助中国规划设计了第一条地铁——北京地铁1号线。如今，昔日的“学生”要到俄罗斯修地铁，很多俄罗斯人难免发出质疑。铁建重工真诚邀请了俄罗斯专家到中国考察。在北京地铁8号线工地，俄罗斯政府和建设单位考察团成员惊叹于“中国制造”和“中国建设”的高水平，“眼见为实”的亲身体验，彻底打消了他们此前的疑问和顾虑。

2017年6月8日，中国盾构机拥有了进入俄罗斯市场的合格证。

为解决俄罗斯地区极寒条件下盾构施工难题，铁建重工研发了5台直径为6.25米的盾构机，并以俄罗斯家喻户晓的热播剧《爸爸的女儿们》中5个女儿命名，分别为玛利亚、达利亚、耶甫盖尼、加丽娜和波丽娜，从2018年6月至2019年1月，5台盾构机在莫斯科西南部完成掘进始发。

2018年11月13日，北京，国家博物馆。“伟大的变革——庆祝改革开放40周年大型展览”开展。“加丽娜号”土压平衡盾构机，作为掘进机行业唯一代表，入选此次展览。

潮平两岸阔，风正一帆悬。

2014年5月10日，习近平总书记到河南考察中铁工程装备集团时提出，推动中国制造向中国创造转变、中国速度向中国质量转变、中国产品向中国品牌转变。

中国科研人员以自身的豪情，践行着“三个转变”，使中国大盾构机从无到有、从有到优、从优到强，逆袭成为在世界上响当当的“中国品牌”。

最新统计数据显示，截至目前，中国盾构机订单总数超过5000台，已出厂超过4500台，出口海外约40个国家和地区。

“中国盾构机百花盛开的春天已经来临，中国盾构机大国的地位已经确立，中国盾构机强国的地位正在确立！”对中国大盾构机发展的光辉历程，中国工程院院士、2018年度国家最高科学技术奖获得者钱七虎说。

①世界首台矿用小转弯盾构机“贵能1号”下线。

②世界最大直径硬岩盾构机在格鲁吉亚KK公路项目中得以应用。

受访者供图

