

跟着院士学科技

电影《流浪地球》为我们描绘了一幅震撼场景：当地表沦为冰封炼狱，人类文明整体转入地下，数十亿人在岩层深处建起城市、延续烟火。

从科幻走进现实，人类“向下”探索的步伐令人惊叹。北欧的地下教堂、新加坡的地下弹药库、中国纵横交错的万里地铁网……当城市的天然线不断攀升，地平线以下的“暗域疆土”也在悄然扩展。

从军事视角审视，这片“暗域”的战略分量更是不可估量。2000多年前，《孙子兵法》便有“善守者，

藏于九地之下”的论述。如今，面对精确制导武器和新型钻地弹的威胁，如何在地表深处构筑起攻不破、瘫不了的战略防护体系，已成为大国角力中的“最后一道防线”。

脚下的世界，究竟还藏着多少秘密？本期“跟着院士学科技”，我们邀请“八一勋章”获得者、中国工程院院士、陆军工程大学教授钱七虎，与他的科研团队一起为我们讲述地下空间的战略价值与未来图景。

用科技的眼光打开“地下空间”

■钱七虎



从“空间配角”走向“重要支撑”

地下空间通常是指地表以下的空间。但在工程学家眼中，脚下这片土地绝非只有泥土与岩石，而是一幅正在徐徐展开的、能够承载诸多人类社会功能的“立体画卷”。

几乎所有地上空间利用类型都能在地下找到映射。这种映射，其实早已融入我们的生活脉络：从“住”在黄土高原——先民们挖掘出冬暖夏凉的陕北窑洞，那是人类利用地下空间的早期智慧结晶；到“行”在繁华都市——呼啸而过的地铁每天承载着数以亿计的乘客，成为城市的“大动脉”；再到关乎“吃”与“用”的生命之源——地下的泵站与管网默默输送着水源，为人类的生产生活提供源源不断的滋养与活力……从古代的居居之所到现代的城市建设重要组成部分，地下空间已悄然完成一场跨越。以我国为例，截至2024年底，我国城市地下空间累计建筑面积已超35亿平方米，近5年新增量占城市建筑总面积约20%。

地下空间开发利用的转折点发生在工业革命后。1863年，蒸汽机车的轰鸣声打破了地下的沉寂，英国伦敦建成了世界上第一条地铁。这标志着人类开始系统化、规模化地开发城市地下空间，一个崭新的“维度”被正式打开。

进入现代，随着地面空间日益拥挤，战争形态发生巨变，人类不得不将目光投向地下。1981年，联合国自然资源委员会正式将地下空间确定为重要自然资源；2007年，雅典国际地下空间会议将其定义为“拓展的前沿”；2010年，联合国“国际行星地球年”将地球深部作为地球科学的最后前沿；2023年，新加坡国际地下空间会议将其明确为“下一个前沿”……这一切都预示着，人类对地下空间的认知与利用将向更宏大、更深邃的维度进军。

凭“天然禀赋”铸就“战争之盾”

在我国，现代城市地下空间开发利

用是从人防工程建设开始的。地下空间所具有的岩土覆盖层，赋予了人防工程天然的物理防护能力和隐蔽特性。作为防护工程的研究者，我们常被问到一个问题：现代武器的威力那么大，钻地弹能击穿几十米厚的混凝土，藏身在地下有用吗？

答案是肯定的。物理学告诉我们，岩土介质具有天然的“吸能”特性和极佳的隐蔽性。不妨想象这样一个更为极端的场景：当一枚数十万吨当量的核弹在头顶炸响，地面瞬间会变成一片火海，方圆数百公里内生灵涂炭。此时，如果你身处地下防护工程中，厚实的岩土层就像一个巨大的“吸能海绵”，把巨大的冲击波能量“拒之门外”。哪怕在爆炸点的正下方，只要工事达标，你依然安然无恙。至于令人谈之色变的核辐射，仅仅1.5米厚的土层，就足以抵抗约99.9%的γ等致命射线。

地下空间虽具有天然的防护特性，但仍需科学设计才能发挥功用。以防护工程孔口设计为例，20世纪70年代，我们面临着“道阻且长”的难题：在核爆现场，若保护飞机的地下掩体大型出入口防护门无法抵抗冲击波，里面的战机就会变成废铁。传统的厚重钢门不仅笨重，还极易变形卡死。当时，我们没有蜜子，而是另辟蹊径，设计了一种独特的“气动”装置——利用核爆炸产生的巨大压力波，反过来将门压紧，“借力打力”，让爆炸的力量成为我们的护盾。

如今，这种“铸盾”理念已深度融入我国城市建设的肌理，地下空间兼顾人防已纳入《中华人民共和国人民防空法》等国家法规；利用类型也从早期的单一人防工程，到如今集地铁、地下车库、地下综合管廊、地下综合体和地下储库于一体的庞大系统，一个与地上城市紧密联动、功能互补的立体城市已然成型。其意义不仅是为了拓展生存空间，更是为了构筑国防盾牌。如今，许多国外城市的地铁同样考虑了民防要求，在一些局部冲突中，发挥了重要的防护功能。

以“科技创新”拓展“前沿疆域”

作为一名“为国铸盾”60余载的老

兵，我深知未来的大国较量，不仅决胜于九天之上的浩瀚苍穹，也在九地之下的前沿空间。未来，拓展新型地下空间，还需以科技创新为支撑。

——构建“深地中核”，向深地要战略纵深。

现代战争残酷地揭示，国防不比比拼谁的拳头硬，更比拼谁的体系能存活。构建“深地战略节点”，成为未来的发展方向之一。各处防护工程不再是孤立的掩体，而是通过地下高速通信与交通网络联结的智能生命体。指挥中枢、数据中心、战略武器依托亿万年形成的岩层屏障，形成具备极高抗毁性和自持力的“国家地下神经网络”。当关键战略资产深植于大地根部，即便地面遭受雷霆万钧的打击，国家的“心脏”依然能在地下强劲跳动。

——编织“地下物流网”，创造打不断的城市循环。

地下客运和货运在百年前几乎同时被提出来。地下客运已通过地铁等方式在世界主要大城市实现，但地下货运物流系统还未实现规模化商业化运行。设想未来，大宗物资与快递包裹搭载全自动舱体车，在专用隧道中“遁地穿梭”，利用自动运载工具实现与物流末端网点、小区、商场或自提柜等设施的连接，形成智能运输及分拣配送的智慧物流系统。这能将地面归还给绿地与行人，缓解拥堵与污染。凭借几乎不受外界环境干扰的优势，一条条深埋地

下的“大动脉”，将成为维系城市运转补给“生命线”。

——助力“双碳”目标，守卫绿色生态基石。

地下空间可响应国家“双碳”目标，为各类减排增汇措施提供稳定充足的空间支撑。通过将原本占据大量地表空间的城市交通、停车场、综合商业设施等建设于地下，将宝贵的地面空间规划为城市绿地，利用植物的光合作用来减少温室气体在大气中的浓度，这就是生态碳汇；也可以通过高压注气技术，将工业产生的巨量的二氧化碳“捕获”，封存于深层地质构造中，实现人工碳汇。地下空间还可以通过地下天然气等清洁能源以及地下蒸汽、地热水、干热岩等地热能发电供电，或是通过地热水、地下蓄水等方式进行地下储能等等。

从战略纵深到城市命脉，再到生态基石，地下空间的深度开发，正以前所未有的方式重塑国家安全的维度与韧性。它不仅是物理空间的拓展，更是国家生存能力、发展潜力与可持续发展关键支撑。面向未来，这片深邃的国土将承载起更宏大的梦想。深耕地下，就是守护地上；点亮深地，方能照亮未来。

上图：由中国铁建打造的一台国产14米级超大直径盾构机“奋斗者”顺利下线，将被用于新建高铁长江隧道工程。

新华社发（李悦、郭东军整理）



寄语青年科技人才

左图：钱七虎近照。AI修饰生成素描画

科技创新没有捷径，机遇永远只给那些随时做好准备的人。时代需要的是守得住初心、耐得住寂寞、坐得了“冷板凳”的青干苦干实干者。

——钱七虎

神奇的“无容器材料实验柜”

■王星懿 薛勇

我们的太空·新知课堂

距离地球约400公里的近地轨道，中国空间站内，一台银灰色的“无容器材料实验柜”静静运转。在静电场中，金属液滴被准确地悬浮起来，用激光加热点燃成炽热的光球，在微重力的超常环境里，书写着中国空间材料科学领域的新篇章。作为一项重要的关键技术装备，“无容器材料实验柜”既是国家在航天技术方面取得突破的标志之一，更是托举中国材料科学向深空迈进的关键基石。

随着空间技术和材料科学的深度融合，空间材料科学这个跨学科领域随之诞生。在地面上，重力的束缚、容器与熔体的接触，让材料的相变规律难以精准捕捉。而在外层空间特有的微重力、高真空、强辐射的特殊环境下，无容器实验环境为打破传统的地面研究技术壁垒赋予了全新机遇。

“无容器”，顾名思义就是摆脱容器

承载，让实验样品在悬浮状态下完成熔炼全过程。这是这台实验柜最神奇的地方，也是其最核心的特质。熔融态的金属或者非金属利用静电悬浮技术，以液滴的形式悬挂在空中，和容器壁完全隔开。在空间站微重力环境里，通过精确调节样品的库仑力大小和方向，就能准确地将样品定位于预定位置。相比于电磁悬浮、超声悬浮等其他悬浮方式，静电悬浮具有电磁干扰小、气流扰动小的特点，为实验创造了理想的环境。相较于地面环境，依靠空间站所给予的微重力状况，静电悬浮所必需的电压明显减小，样品运动趋于稳定，液滴的形态也变得比较圆润，实验条件得到极大改善。

“无容器材料实验柜”就像一颗悬在太空中的科研火种，不仅标志着我国材料科学进入了深空探测的新时期，还为国际空间材料科学研究贡献了独到的中国智慧。未来，这台太空实验柜将迎来更多材料样品的“悬浮之旅”，让太空的材料光照地面产业发展与科技进步的前路。

他山之石

随着定向能技术加速从试验场走向实战部署，过去一年成为高能激光武器发展的关键一年。激光系统正从技术验证转向集成应用，以应对无人机群、巡航导弹及新兴非对称威胁，逐步改写传统防空与导弹防御的作战模式。截至目前，已知最新的外军激光武器主要包括：

美国“赫利俄斯”系统。作为美军“综合激光武器系统”的代表，“赫利俄斯”功率可扩展至120千瓦，兼具“硬杀伤”与“软杀伤”能力。在硬杀伤模式下，其光束可物理摧毁目标；在软杀伤模式下，该系统可干扰或致盲敌方光电传感器与制导系统。该系统目前已部署于阿利·伯克级驱逐舰进行实战测试，可为海军编队提供低成本、高可用的末端防御手段。

英国“龙火”系统。“龙火”激光武器在2025年的测试中成功击落时速650千米的高速无人机，完成英国首次超视距激光打击验证。该系统具备精度高、快速响应等特点，为应对低成本无人机集群提供了高性价比解决方案，已被英军列为构建未来舰载及陆地防空体系的重要装备。

德国高能舰载激光武器系统。该系统由莱茵金属公司与欧洲导弹集团联合开发，整合了高能激光器与先进瞄准跟踪单元，具备持续作战能力，预计2029年交付德国海军。作为传统近防武器的补充，该系统旨在应对中小型无人机与快艇集群，以提升持续作战条件下的防御经济性。

澳大利亚“阿波罗”机动激光系统。该系统功率可达100至150千瓦，支持360度全向覆盖，既能独立部署，也可接入北约防空指挥网络。其模块化供电设计支持外接电源或自带能源，适用于前沿部署与要地防护。

上述系统的发展，充分体现出当前

或将重塑战场防御格局

激光武器

外军激光系统在功率、多功能性与作战集成方面的最新进展：一是功率持续提升，多数系统已突破100千瓦门槛，增强了对更远距离、更坚固目标的毁伤能力；二是系统集成深化，激光武器正被纳入现有指挥控制与防空网络，实现多传感器协同与火力统筹；三是作战功能拓展，激光武器已从单一硬杀伤向“软硬结合”演进，兼具摧毁、干扰与侦察功能；四是后勤优势凸显，近乎无限的“弹匣”与低单次发射成本，为应对集群威胁提供持续拦截能力。

随着各国加速推进列装计划，激光武器或将成为改变攻防成本平衡、提升作战体系持久性和多层防御效能的重要武器装备。

芯片制造有了千瓦光源

■涂一可 薛秉航

近日，全球半导体设备龙头企业ASML公司宣布，其极紫外光刻光源系统成功实现1000瓦功率的稳定输出。据预测，到2030年，这项技术将使芯片产能提升50%。

光源的突破如何带来芯片产能的提升？要理解这一突破的分量，需先走进光刻机的微观世界。

芯片的性能与产量，很大程度上取决于制造它的一道核心工序——极紫外光刻。极紫外光刻技术利用波长仅13.5纳米的光线，将电路图案印刷到晶圆上。然而这种光线在自然界极难获取，需要通过高能激光轰击熔融锡滴产生等离子体来制造。光源功率的大小，直接决定了光刻机每小时能处理多少晶圆。

长期以来，量产型光刻机的光源功率徘徊在600瓦左右。此次突破1000瓦功率，并非简单“加大火力”，而是通过两

项关键创新实现了效率跃升：一是将锡滴喷射频率从每秒5万提升至10万，让“弹药”更充足；二是在激光轰击时采用“双脉冲串”策略，先用一束弱脉冲将锡滴预热整形，让它处于最佳受击状态，再用强脉冲轰击，使能量释放更充分。这好比生火时先架好柴薪再点火，远比直接猛烧效率高。

千瓦级光源意味着单片芯片的成本会更低，也意味着先进制程芯片的供给将会提速。作为现代数字经济的“工业粮食”，芯片能否高产、优质，很大程度上取决于光源技术。也正因此，光源技术的每一次进步，都会沿着产业链传导至每一个依赖芯片的领域，牵动全球产业格局的神经。

热点追踪

涂一可 薛秉航