

高超声速飞行器，其飞行速度等于或大于5倍声速，每小时至少可飞行6120公里。如此高速飞行，需确保飞行器关键结构部件承受剧烈的空气摩擦及高达2000-3000℃的热气流冲击而不被破坏。在超

声速热防护领域，陶瓷材料以其高熔点的特性脱颖而出，成为各大国竞相研发的优选材料，而陶瓷热防护技术也成为高超声速飞行器能否安全飞行的关键技术。

陶瓷热防护材料——

高超声速飞行器的“铁布衫”

■林文强 兰济民 盛子程

高技术前沿

热防护是一道世界难题

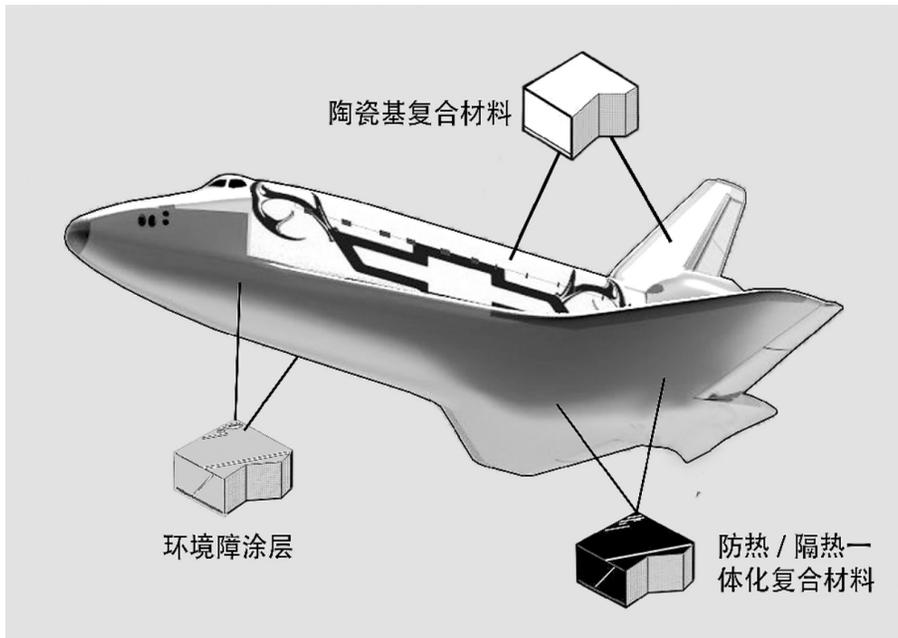
2003年，美国哥伦比亚号航天飞机发射后不久解体，搭载的7名航天员全部罹难。事后调查发现，在飞机发射82秒后，一块热防护材料从燃料箱上掉落，击中了哥伦比亚号左翼的复合材料板，1400℃的高温气体窜入内部，陆续烧毁了温度传感器，导致飞机左翼失去平衡。在强烈的摇摆中，飞机解体坠毁。这是一场令世界震惊的由热防护材料失效引发的灾难性事故。

如何实现对高速飞行器的热防护？该项技术的难度在美国的探寻历程中可见一斑。

1952年，美国首先提出将导弹头部做成钝形，可以提供较厚的激波层，耗散大量能量从而减少导弹表面的气动加热。但后续实验发现，仍有大量的热传递到导弹表面。随后，研究人员提出使用高热容的材料吸走飞行器表面的能量，后由于吸热量不够且过于笨重而放弃。

1955年，美国陆军导弹局在一次试验中发现，在2570℃的高温下，导弹外壳材料表面严重烧蚀，而距表面6.4mm以下的部位却完好无损。原来，这里使用了能够在分解、融化、升华等多种状态间转化、从而吸收大量热能的热防护材料。

此后，受到启发的研究人员在实验基础上研发出轻质、中等弹头尺寸的陶瓷热防护材料，并在1956年配装在大力神导弹上进行飞行测试。经过反复实验改进，美国最终研制出高性能陶瓷热防护材料，为超音速飞行、宇宙航行、火箭发动机等技术扫清了障碍。



制图：陈晨

最有前途的热防护材料

陶瓷热防护材料有很多种，其中碳/碳复合材料以其优异的性能引起了各国的广泛关注。严格来说，碳/碳复合材料是指用碳纤维增强碳基体的复合材料。除了具有强度高、耐热性好等一系列特点，该复合材料还有一个“独门绝技”，那就是高温下其力学性能不降反升，表现出更高的强度和刚度，因此被研究人员认为是下一代高超声速飞行器最理想的热防护材料。

众所周知，现代楼房之所以坚固，很大程度上得益于钢筋混凝土的发明。碳/碳复合材料如同一面“墙壁”，

其中碳纤维是“钢筋”，是唯一能在3000℃以上仍具有高强度的纤维；碳基体是“水泥”，发挥主体的承载烧蚀等作用。单纯的钢筋和水泥都无法建起高达几十层的楼房，但是将二者混合到一起，就可以实现强度和刚度的完美结合。碳/碳复合材料也一样，单纯的碳基体较脆易碎，用碳纤维增强以后就可以利用纤维和碳基体的界面结合作用，从而得到轻质高强的高性能复合材料。

陶瓷热防护材料有对付热量的三重“神功”：第一重是低温下的烧蚀耗热机制，即低温热量通过氧化烧蚀来“内部消化”，由于复合材料所用的陶瓷成分本身的熔点较高，因此可以耐受低温的热量；第二重是中温下通过表面辐射来散发热量，由于碳/碳复合材料的导热率较高，因此可以将热量快速传递和

辐射出去，达到迅速散热的效果；第三重是高温下碳材料的升华作用，由于材料表面温度极高，碳基体可以直接升华为气态，从而带走大量的热。

在这三重“神功”的防护下，高超声速飞行器在超音速飞行时，即使气动加热使其外表面温度很高，陶瓷热防护材料也可以保证尖端形状不变、打击精度较高且不影响内部制导电子元器件的正常工作。

各国抢占的科技制高点

陶瓷热防护材料在军事领域具有极高的应用价值。

首先，陶瓷热防护材料大部分都是纤维增强的复合材料，质量更轻。美国

X-37B上使用的陶瓷热防护材料密度仅为0.4g/cm³，与生活中泡沫板的密度相当。相比于上世纪使用的高温合金防护材料，陶瓷质量仅相当于原来的三分之一，这对于“为减轻每一克重量而奋斗”的航天领域而言是极大的“利好”。

其次，陶瓷热防护材料耐温极限更高。早期使用的金属材料极限温度仅为1500℃左右，而陶瓷热防护材料可在1700℃下稳定服役，短时间甚至可承受2000-3000℃高温。耐温极限提高后，飞行器就能以更高的速度飞行，从而大大增加实战能力。

最后，陶瓷热防护材料具有制备周期短、成本低、可重复使用的特点。初期使用的高温合金热防护材料需要进行多道工序的加工，制备周期长且造成大量原料浪费。而陶瓷热防护材料可使用模具铺展纤维，可使复杂结构一次成型，周期更短且成本更低。更重要的是，目前陶瓷热防护材料正在向可重复使用的方向发展，将极大降低军事飞行器的维护和制备成本。

目前，世界军事强国都在积极抢占陶瓷热防护材料的“科技高地”。美国在役的陆基战略核导弹——“民兵”系列，使用的就是碳/碳复合材料。美国的X-37B采用了防热/隔热一体化设计的整体增切抗氧化陶瓷热防护复合结构，在耐温能力、强韧性和制备尺寸等方面均有较大提升。

俄罗斯则在苏联“暴风雪号”航天飞机复合材料防热瓦的基础上加以改进，研制出优异的“防热/隔热一体化”复合材料，经受住了3800℃的烧蚀环境的试验测试。德国在使用温度为1000℃的隔热材料基础上，加入耐高温的氧化铝纤维，研制出具有多层组合结构的新型隔热材料，最高使用温度可达1600℃。

随着飞行器的飞行速度不断提高，热防护技术已成为各军事大国竞相抢占的科技制高点。作为高超声速飞行器“铁布衫”，陶瓷热防护材料也日益成为技术关键点，具有极高的潜在军事价值。

打通科研成果转化的“最后一公里”

■郭继业 冯鹏

随着作战样式、战场环境、装备性能等方面的不断变化，科技创新已然成为争夺战场主动权、赢得未来战争的关键因素。

当前，国家和军队高度重视科技创新发展，新型信息化武器装备陆续列装部队，这既是军队转型发展的必然要求，也是建设世界一流军队的必备能力。

今年年初，习主席在视察中部战区陆军某师时强调，要抓住科技创新这个牛鼻子，把部队科技含量充分释放出来，把科技优势转化为能力优势、作战优势。科研成果及成果转化是科研创新能力的直接体现，更是打赢信息化战争的核心要素。基层官兵身处战斗力生成一线，拥有创新的源头活水，不仅要实际出力，更要充分发挥好科研成果对战斗力建设的助推作用，打通科研成果转化的“最后一公里”。

然而，基层部队在运用科技创新推动战斗力建设方面还存在着一些亟待解决的问题。有的头顶安全事故的“紧箍咒”，对一些“高精尖”科研成果不敢用；有的缺乏科学理念，不懂得如何释放科研成果的潜在能量；有的习惯于因循守旧，把培训学习看成出差……诸如此类的问题如果不及早解决，练兵备战就难以以上层次，未来战场就可能“掉链子”。

如何在基层部队打通科研成果转化的“最后一公里”？笔者认为，主要有以下几个方面：

首先，完善成果转化机制。构建有利于科技成果进入部队建设和训练实践的导向机制，营造有利于科技成果转化的环境，制定激励政策、容错机制，为那些敢于创新的官兵加油鼓劲。各级应通过优化政策，为参与基层科技创新的官兵提供更多的服务保障，使其能够全身心投入到科技创新的工作中，破解战斗力建设难题。

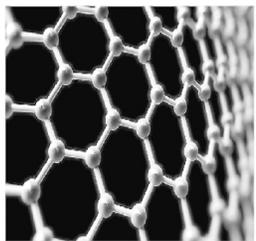
其次，培育成果转化人才。要充分尊重人才、关爱人才，扎实做好育才、引才、用才工作，把提高官兵科技素养作为一项基础性工作来抓。积极与院校和军工企业交流合作，按专业化要求规划人才成长路径。充分发挥专业技术骨干作用，为基层创新提供技术和理论服务，推进研究成果方便快捷转化为战斗力，打破“维修靠工厂，育才靠院校”的旧格局。

最后，注重成果转化过程管理。加强对科研成果转化、利用的监督管理，并对科研成果转化情况进行有效评估，建立反馈跟踪机制，使科技成果转化落到实处。

战而不研则浅，研而不用则空。在科技兴军征程中，只有上下齐心，使“学科科技、科研科技、用科技”在全军蔚然成风，才能打通科研成果转化的“最后一公里”，提升打赢未来信息化战争的能力。

新成果速递

新材料涂层技术 为舰艇卸下“包袱”



前不久，美国海军研究人员开发出一种可用于潜艇和其他水面舰艇的新材料涂层。

这是一种具有粗糙表面的白色超疏水涂层，其底部由数百万个可束缚气体的微结构组成。在航行过程中，附着在舰体的涂层形成一层空气膜，使得液滴无法依附在舰体表面，从而降低舰艇在水中航行的摩擦力和阻力，减少燃料消耗。

研究人员称，航行阻力带来的燃料消耗占整个舰艇燃料使用量的60%左右。未来，随着新材料涂层技术的广泛应用，每艘舰艇预计可节省数百万美元的燃料成本开支。

此外，研究人员还开发了其他减阻涂层技术，如排斥油、酒精、甚至化生酱的涂层，并探索挖掘其军事应用潜力，例如用于作战服和防护眼镜等。（夏昊）

变形机翼

让飞机像鸟儿一样

■张峻敏

看着鸟儿展翅高飞，你是不是也希望搭乘的飞机也能拥有一双真正的“翅膀”？

日前，美国航空航天局成功开展了“翼展自适应机翼”项目试验。这种飞机的机翼尖端能在飞行中上下弯曲，借此改变空气动力学特性。

无独有偶，欧洲研究人员也在此前成功进行了变形机翼的风洞试验，预计将于2020年开展飞行验证。

看来，我们离像鸟类一样飞行的梦想越来越近，飞机拥有一双“会魔法”的变形翅膀，未来或将成为现实。

从古至今，人类文明中都有关于飞行的神话。迷恋飞行的科学家们，从19世纪起就开始使用数学方法精确计算“翅膀”的最佳尺寸与形状。一个多世纪前，人们想出了使用带襟翼的刚性机翼来产生足够升力的方法，终于把笨重的飞机送上了蓝天。不过，刚性机翼在空气动力学方面的效率并不高。人们虽然先后研究出“鱼鹰”倾转旋翼机的“调整机翼形状”“主动气动弹性机翼”等可变形的机翼，但离真正的“翅膀”依旧相去甚远。

变形机翼是将一系列新材料、传感器综合应用于飞行器的创新设计，主要通过灵敏的传感装置，在飞行过程中根据不断变化的飞行条件，灵活持续地改变机翼形状。换句话说，拥有了变形机翼，飞机就能像鸟儿一样在空中盘旋、倒飞和侧向滑行，使得飞机的机动性能得到质的提升。



早在20世纪80年代，美国就开始致力于像鸟类翅膀一样灵活摆动的可变形飞机机翼研究。美国空军曾在F-111型战斗轰炸机上测试“任务自适应机翼”。这种机翼融合了可变掠角和无缝变弯度技术，可根据飞行情况自动改变机翼的几何参数，进而使飞行阻力减少20%以上。由于技术尚不成熟，这种机翼反而增加了飞机的重量和功率需求。从1994年开始，美国国防部高级研究计划局利用无人机开展“智能机翼”研究。此后，美国又开展了“变形飞机结构”项目，对可改变飞机机翼掠角、弦长和面积的无人机进行了验证试飞。1996年至2005年，美国空军与美国

航空航天局合作研发了一种利用气流扭转自身的“主动气动弹性机翼”，能在高速飞行中更好地实现滚动控制。

其实，传统刚性机翼也拥有各种可移动的控制翼面，飞机飞行中正是通过改变翼面形状实现“换挡”。能自由调整弧度的变形机翼相当于为飞机挂上了“自动挡”，能最大限度地减少飞行阻力。

上述这些“奇思妙想”之所以阻力重重，主要是变形机翼的研制难度极高。这种“变换自如”的机翼，对结构设计和材料运用提出了更高要求。此前，人们曾尝试在机翼内使用机械装置使其变形，但复杂的结构不

仅增加了重量，更降低了飞行的可靠性和安全系数。近年来，先后出现了利用铝合金、复合材料和智能蒙皮制作的变形机翼。欧盟资助的“智能机翼与传感技术”项目也正在开展“电话性机翼”研究，旨在通过形状记忆合金和压电控制器实现会变形的“翅膀”。

从2014年开始，美国航空航天局和美国空军研究实验室联合开展“主动柔性后缘襟翼”项目研究。这种变形机翼由柔性内部结构和无缝弹性蒙皮构成，预计将很快在KC-135加油机和商用飞机上进行飞行测试。2016年，美国航空航天局与多家高校开始合作研发增强碳纤维塑料组成的可变形机翼。这种可变形机翼由可运动的轻质结构片组成，通过对每个部件的“数字化”控制实现整体的形变。美国航空航天局另一个“展向自适应机翼”项目，旨在通过新型轻质形状记忆合金实现机翼折叠，目前已成功实现了飞行过程中机翼0-70度之间的上下折叠，下一步将移植到F/A-18战机上进行全尺寸测试。

变形机翼技术一旦研制成功，将实现飞行过程中升力与阻力灵活运用的“智慧升级”。一方面，变形机翼通过改变机翼形状提升飞机性能，能进一步提升燃油利用效率，显著降低飞行成本。另一方面，飞行员还可通过变形机翼灵活应对飞行过程中遇到的任何特殊情况，从而进一步提升飞机的安全性和战术性能。