

科技大讲堂

2022年11月8日,第十四届中国航展在珠海开幕。伴随着发动机的轰鸣声,4架歼-20组成钻石编队从低空掠过。单机表演中,歼-20在一分钟的时间里连续完成“小半径急转”“旱地拔葱”等动作,接下来的“筒滚”“横滚”更是引得观众赞叹不已。

所谓“外行看热闹、内行看门道”。“筒滚”“横滚”对于歼-20只是“牛刀小试”,真正让海内外航空专家们大为惊叹的,却是看似不起眼的“小半径急转”“旱地拔葱”等动作。战斗机在高速飞行中完成这样的动作,不仅需要优异的气动设计与飞行姿态控制能力,更重要的是有一副“钢筋铁

骨”——战斗机在进行大过载机动时,机身结构通常要承受9倍重力加速度;飞机设计时一般还要在此基础上再留出约50%的冗余。这意味着歼-20在做“小半径急转”“旱地拔葱”等动作时,机身结构需要承受数百吨质量所产生的作用力。

歼-20一身“钢筋铁骨”,关键在于其“强硬”的机身结构材料。机身结构材料,顾名思义就是承受战斗机在飞行过程中气动、维持气动外形的结构材料。性能优异的机身结构材料是一架优秀战机不可或缺的部分,更是战机决胜空天的“硬脊梁”。

国防科技大学空天科学学院讲师贺雍律为您讲述——

机身结构材料:决胜空天的“硬脊梁”

■ 顾莹 本报特约记者 张照星

“一代材料,一代战机”

从莱特兄弟发明飞机至今,航空工业已经走过了百余年时光。在这个过程中,材料和飞机在相互推动下不断发展。所谓“一代材料,一代战机”,正是世界军事航空发展史的真实写照。

总体来说,战机体身结构材料的发展经历了四个阶段:

第一阶段从1903年至1910年。这个时期,飞机结构材料主要以木-布为主。木头构筑起飞机的机身框架,帆布为飞机提供气动外形。木头作为结构材料,凭借着超轻的质量和较低的密度,获得了长久的生命力。直至第二次世界大战时期,木头仍被应用于部分战机上。其典型代表就是英国的“德·哈维兰-蚊式战斗轰炸机”。这款战机体拥有“木头奇迹”的美誉,身轻如燕、性能优良,是英国皇家空军中一种颇具特色的机型。

第二阶段从1910年到1949年。这一阶段的机身材料以钢-铝为主。高强度的钢常被用作主承力的机身框架结构,铝合金则被用于机身蒙皮。以钢-铝材料制作的飞机机身,其强度、结构刚度以及抗弹能力都较木-布结构有了质的飞跃。二战中,主力战机体型例如美军的P51野马、F6F地狱猫以及英国的喷火式、德国的梅塞施密特Bf-109战斗机无一例外都采用了钢-铝结构。

第三阶段是从1950年到1979年。这个时期的机身材料以钢、铝、钛为主。在耐高温方面,美国与苏联走了两条截然不同的路线。美国走的是“高端路线”——钛合金。钛合金密度低,以钛合金制成的飞机结构质量较轻,然而其原材料价格偏高,不易加工。典型代表是美国设计的一款高空高速侦察机SR-71黑鸟,飞行速度可达3.35马赫。苏联则选择了“平民路线”——不锈钢。相比之下,不锈钢原材料易得、易加工,成本低廉。典型代表是苏制的米格-25,其机身80%的结构采用不锈钢制作,最大飞行速度达到2.8马赫。值得一提的是,设计米格-25的初衷是为了拦截SR-71。然而,由于其笨重的不锈钢机身,历史上SR-71曾多次袭扰苏联领空,却从未被成功拦截。

第四阶段是从20世纪80年代至今。材料学家经过长期探索,在已知的单质材料中,已找不到密度低于铝合金、强度高于不锈钢,且耐热温度接近钛合金水平的材料了。随着高性能耐



第十四届中国航展闭幕当天,空军歼-20战机进行飞行展示。本报记者 栾 毓摄

热聚合物基体被合成,轻质、高强的碳纤维开始大规模生产,先进复合材料开始进入材料学家的视野。先进复合材料低密度,性能可设计、易成型。同等结构强度下,采用复合材料制作的机身较钛、铝、钢都能大幅度减重。现在在美国第四代战机F-22、F-35等的复合材料用量高达24%和30%,俄罗斯最新五代机的复合材料用量也达到了15%。复合材料在先进战机体上的大规模应用,标志着现代战机体从“铝为主,钛、钢结构并存”的时代迈向“复合材料为主,铝、钛、钢结构共存”的新时代。

几经更迭,追求始终如一

从天然材料到金属材料,再到复合材料,几经更迭,机身结构材料的追求始终如一——“其坚如钢,其重如翎”。

其坚如钢,是指具有优异的强度与刚度。更高的材料强度可以赋予机身更优异的抗击打性能和更高的抗过载

能力。优异的材料刚度则为机身结构带来更强的抵御变形能力。战机在高速飞行过程中,时刻承受气动载荷。如果抵御气动变形的能力不够,轻则降低飞机的机动效率,重则会引发不可逆的变形进而导致机毁人亡。

其重如翎,就是指机身材料要具有较低的密度。战机的质量是影响综合性能的主要指标。过大的质量不仅会降低飞行速度,影响空中机动能力,还会缩短航程。机身结构材料在战斗机的质量中占比通常超过40%。因此,在结构材料上减重是增加战斗机综合性能的有效手段。

纵观结构材料的发展历史,做到“其坚如钢”的材料不少,能实现“其重如翎”的也很多,但同时兼具两种性能的结构材料屈指可数。为了便于比较材料“轻质高强”的能力,材料学家发明了“比强度”和“比模量”的概念。比强度是用材料的强度除以材料表现密度。同体积的材料,比强度越高,抗破坏的能力越强。比模量是用材料的弯曲度除以密度。同体积的材料,比模量

越高抗变形的能力越强。

从木材到钛合金,机身结构材料经历数十年的发展,其比强度与比模量并未发生质的飞跃。直到复合材料、特别是碳纤维复合材料的出现,机身结构材料水平又上升到一个新高度。碳纤维复合材料的比强度是钛合金的3倍-5倍,比模量是钢材的2倍-3倍。这意味着,同等性能下,机身结构采用碳纤维复合材料相较于钛合金或钢材减重达到50%-80%。复合材料的耐热性能虽不及钢和钛合金,但部分型号也能达到300℃。此外,复合材料还兼具优异的加工性能与良好的耐腐蚀、耐候性能。最为重要的一点是,复合材料具有良好的性能可设计性。通过更换树脂与增强纤维的种类,以及添加不同的功能填料,可获得不同性能特性组合的复合材料。这种性能可设计性赋予了其“结构-功能一体化”的特性。这样一来,复合材料不仅可以具备承载性能,更兼具透波、吸波、隐身等功能特性。

当然,比强度和比模量并非材料学家选取机身结构材料的“唯二”标准。

以钢材为例,钢材的比强度、比模量相较于铝合金、钛合金并没有优势。但其绝对强度较高,在对绝对强度与刚度以及服役温度要求较高的部位,诸如飞机防护系统、起落架、主承力框架、高温驻点等仍是无可替代的关键材料。直到今天,先进战机体上仍有钢材的身影。

新挑战,也是新机遇

随着现代战争作战样式不断丰富,科技密集程度不断提高,战机也在不断更新换代。目前最为先进的第五代战机,不仅需要拥有杰出的机动性、超强的隐身伪装能力,还需要具备多样式作战的可整合性。这些功能要求给机身结构材料研究带来新的挑战,同时也为战机综合性能提升带来新的机遇。

复合材料是由有机高分子、无机非金属材料或金属等几类理化性质不同的材料,通过复合工艺组合而成的新型材料。它既保留原组成材料的重要特色,又通过复合效应获得原来不具备的性能。

面对新的战争需求,复合材料需要不断“通关升级”,习得更多“武林绝学”。

例如,“身如金刚,水火不侵”。战机在高速飞行时,由于与空气的剧烈摩擦,会面临严峻的气动加热问题。过高的温度会大大增加复合材料的失效风险,为战机飞行带来安全隐患。因此,需要对机身材料进行耐高温设计,比如采用陶瓷耐高温涂层、气凝胶隔热层以及优化复合材料体系等。

再比如说,“来去无影,以假乱真”。目前,红外隐身已经是很多知名尖端战机的“标配”。新一代战机已经不再满足于单一的红外隐身效果,它试图通过对战机的电磁信号进行伪装,实现以假乱真,迷惑敌人的目的。这可以通过超结构设计或引入功能增强材料来实现。

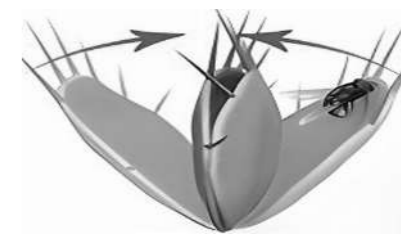
高性能复合材料虽然是新一代战机体身的不二选择,但想要培养这样一名“武林高手”,还需要经过复杂工艺、花费大量的时间和物质成本。以美国隐身战略轰炸机——B2轰炸机为例。它从1997年服役以来,一共只生产了21架,每架造价高达24亿美元,每次飞行任务结束后的维护费用高达千万美元。“造得起,用不起;用得起,养不起”,也是限制尖端战机体发展的重要问题。因此,简化机身复合材料的制备工艺,优化制备流程,提高性价比也是当前急需解决的关键问题。

科技云

科技连着你我他

■ 本期观察:姜鑫亮 刘太阳 王新安

条件反射——仿生触敏响应智能水凝胶

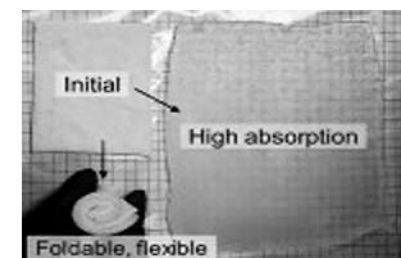


近期,《纳微快报》刊文称,中国科学院宁波材料技术与工程研究所科研团队受捕蝇草的启发,研制了一种对触敏刺激具有多功能响应的新型智能高分子水凝胶。

捕蝇草在飞虫的触敏刺激下,会快速形成电信号响应,从而闭合捕虫夹。而高分子水凝胶在光、热、磁、电等外部环境的刺激下,也会产生相应的变化。科研人员将传统水凝胶中引入过饱和盐溶液,使高分子水凝胶产生结晶。他们还通过局部添加水溶液,实现过饱和盐溶液在水凝胶中的区域化分布,最终实现智能高分子水凝胶在触敏刺激下的图案化结晶。

研究人员表示,这款仿生触敏响应智能水凝胶,在智能信息平台的触敏响应加密-解密领域有一定的应用潜力。此外,它还有可能为智能软体机器人的发展提供新的思路。

身段柔软——新型强吸附性水凝胶



近日,《物质》杂志刊登了美国马里兰州大学研究团队研制的一款新型水凝胶。这种新型水凝胶可吸收、可折叠、可切割,具有强吸附性和稳定性。

普通高吸水性水凝胶可以吸收超过自身重量100倍的水,但干燥后会变成易碎的固体。为了解决上述问题,科研人员将酸、碱和水凝胶的其他成分混装在一起,形成了一种多孔的泡沫状材料。他们再将夹在玻璃板中间,形成薄片并暴露在紫外线下。最后,他们将固定的薄片浸入酒精和甘油并风干。这样制得的凝胶片可保持一年的柔软和灵活,具有较好的稳定性。

实验显示,新型水凝胶吸收并容纳的水基液体是普通纸张中的三倍多。该凝胶片可在20秒内吸收25毫升水,并保持水不滴落;面对更加黏稠的液体,如血液等,该凝胶片可在60秒内吸收近40毫升液体,超过纱布材料的吸收效率。研究人员表示,该凝胶片未来有望在医疗、科研、家庭卫生领域发挥重要作用。

抗菌粘合——

自修复多动态键交联水凝胶



近期,中国暨南大学科研团队成功研制了一款自修复多动态键交联水凝胶。这是一种可注射粘合剂,可以较好地促进细菌感染伤口愈合。研究成果在《材料化学》期刊发布。

受胎鼠启发,科研人员在水凝胶中引入邻苯二酚基团,使得新型水凝胶具备良好的粘附性,可以适应伤口弯曲和扭曲状态等多种情况。在此基础上,研究人员引入了硼酸盐/双二醇,与原来成分相互作用下,进一步改善了水凝胶的机械性能和粘附性能。此外,研究人员还将聚多巴胺纳米粒子引入水凝胶,从而使水凝胶具备了良好的细胞相容性和血液相容性。

研究团队表示,经过改进的水凝胶可以通过注射的方式,填充不规则伤口。它可以减少炎症反应,加速细菌沉积和促进血管重建,显著促进细菌感染的伤口愈合。未来,这款可注射水凝胶或将作为多功能敷料,用于治疗细菌感染伤口。

可控核聚变又有新突破

■ 王 畅 安珺琦 宋 凯

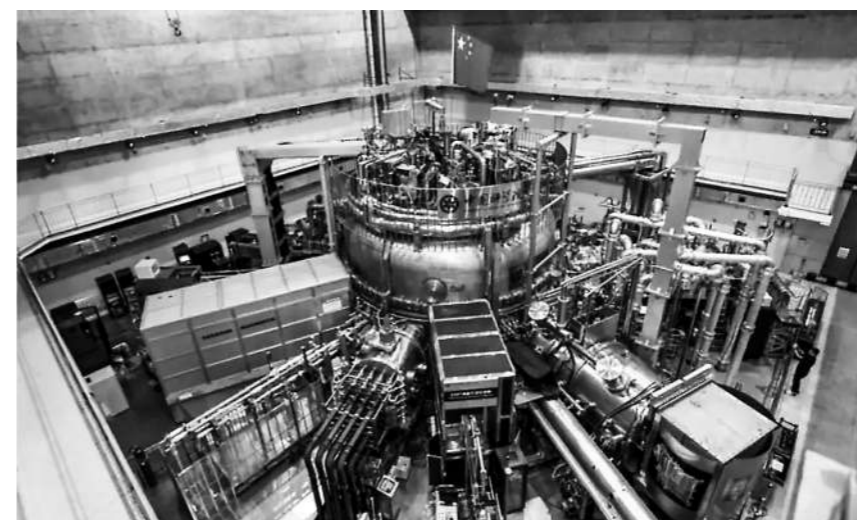
和规模,实现安全、持续、平稳能量输出的核聚变反应。目前,惯性约束核聚变与磁约束核聚变被认为是实现可控核聚变的两种重要方式。

惯性约束核聚变是依靠等离子体粒子自身的惯性约束作用,从而实现核聚变反应的一种方法。其基本思想是:用高功率激光束均匀辐照氘氚等热核燃料组成的微型靶丸,通过烧蚀等等离子体产生的压力,在极短时间内把氘氚等等离子体压缩到极高的密度和温度,从而引起核聚变反应。美国的“国家点火装置”,就是一种惯性约束激光核聚变试验装置。2022年12月13日,该装置取得了前所未有的重大突破。在实验中,它输入了总能量为2.05兆焦的激光,引发了氘氚核聚变反应,最终输出了3.15兆焦的能量。这是人类历史上第一次在可控核聚变试验中实现了净能量增益。意味着人类向“无限的清洁能源”目标又近一步。

磁约束核聚变是指用高强度的磁

场,把氘、氚等轻原子核和自由电子组成的、处于热核反应状态的超高温等离子体约束在有限的体积内,使它受控制地发生大量的原子核聚变反应,释放出能量。其主要通过托卡马克装置与仿星器装置实现。位于中国合肥“科学岛”上的大科学装置“人造太阳”,就是一种基于磁约束可控核聚变的全超导托卡马克装置。近年来,“人造太阳”先后实现了“1.2亿摄氏度等离子体运行101秒”“近7000万摄氏度等离子体运行1056秒”等重大突破,向核聚变能源应用不断迈进。

未来想要实现磁约束核聚变,必须解决高性能等离子体稳态运行这一关键科学问题。等离子体物理研究所发展的高能量约束模式,是国际聚变研究界的一个重大进展。这种先进模式大幅度提高了能量约束效率,具有芯部杂质积累,便于聚变反应生成物排出,维持平稳温度台基等优点。此外,该模式实现了芯部高能量约束与边界低能量损失的兼容,



保证了长时间尺度上的高能量约束等离子体运行。

近几年,人类在可控核聚变领域频频突破,取得了一系列重要成就。然而,距离实现可控核聚变,利用核聚变造福人类,还有很长的路要走。路虽

远,行则将至,随着科学家们不断探索进取,人类距离实现“播种太阳”的梦想将更加靠近。

上图:全超导托卡马克大科学装置(EAST)。 资料图片

热点追踪

近期,《科学·进展》杂志刊文称,中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所核聚变大科学团队,利用有“人造太阳”之称的全超导托卡马克大科学装置(EAST),发现并证明了一种新的高能量约束模式。这种新的稳态高能量约束模式,对国际热核聚变实验堆和未来聚变堆运行具有重要意义。

所谓核聚变,就是指将两个较轻的原子核结合而形成一个较重的核,释放出巨大能量的一种核反应形式。20世纪50年代初,人类通过氢弹爆炸,成功实现了核聚变反应。然而,如果想把核聚变放出的巨大能量加以利用,作为社会生产和人类生活的能源,必须对剧烈的聚变核反应加以控制。

可控核聚变,关键在“可控”二字,特指在一定条件下控制核聚变的速度