



新型原材料

LIAONINGXINXINGYUANCAILIAO



3
2021

主办单位：辽宁省国家新型原材料基地建设工程中心
辽宁省新型原材料产业孵化基地
辽宁省新型原材料产业研究院

准印证号：（辽）097 内部资料 免费交流

CONTENTS

辽宁新型原材料



主办单位：辽宁省国家新型原材料
基地建设工程中心
辽宁省新型原材料产业
孵化基地
辽宁省新型原材料产业
研究院

地 址：辽宁省沈阳市皇姑区陵
园街 17 号

邮 编：110032

电 话：024-86875834

传 真：024-86875834

Q Q：2361454867

邮 箱：2361454867@qq.com

准印证号：(辽)097

出版日期：2021 年 9 月 30 日

印刷期数：4/年

印刷数量：600本

发送对象：新材料相关企业

印刷单位：沈阳枫美印刷包装有限
公司

技术应用

- 02 “十四五”开局之年，航空航天行业—
新材料乘势而起
- 12 高性能纸材料在航空航天、轨道交通、
医药产业、食品等领域的应用
- 14 新材料实现氢气提纯“一步到位”

产业综述

- 16 石墨烯产业现状及趋势
- 19 辽宁省钛材料产业现状及未来发展建议
- 22 辽宁省新材料产业发展现状及展望
- 24 辽宁省精细化工产业发展现状及思路分
析

政策解读

- 28 如何享受国家技术创新中心政策？高铁、
新能源汽车国企案例精解
- 32 《钢铁行业产能置换实施办法》解读

行业动态

- 34 北方最大钢铁“航母”启航
- 35 “集成电路前道高产能深紫外光刻工艺
涂胶显影设备研发”项目顺利通过结题
验收
- 35 半导体及新材料产业基地落大连金普新
区
- 36 今年以来，我省“老字号”“原字号”

“新字号”产业均实现稳步增长 做实
做细“三篇大文章” 做强做精重点产
业链

- 37 首批新序列国家工程研究中心名单公
布我省两家科研单位上榜
- 37 我省成立首批十家科技创新发展智库
- 37 上半年，新增高新技术企业超六百家
主营业务收入同比增长21.4% 我省
高新技术企业“出苗快”“长势旺”
- 38 高效储能的多功能碳复合材料
- 38 净利增长103% 中材科技上半年销售
隔膜产品3.5亿平米
- 39 华南理工大学：自组装有机—无机
表面活性剂热解有序介孔二氧化硅
- 39 填补国内技术空白 太原理工大学研
发出航空航天领域新材料
- 40 稀土超分子感光变色镜片试制成功
- 40 重视！针对新材料等创新型科技加强
关键核心技术攻关
- 40 我国科学家研制出一种“碳弹簧”
- 41 热塑性复合材料风力发电机或将彻底
改变海上风电行业
- 42 美国科学家首次造出双层硼烯材料

大视野

- 43 垄断芯片制造关键材料，日本凭什么
- 46 盘点！中国领先欧美的硬核科技（上）

征稿启事

辽宁省国家新型原材料基地建设工程中心于2018年7月26日挂牌成立。承担为国家新型原材料基地建设提供服务、支撑、保障相关职能。近年来全国多个省市将新材料作为地区经济的重要增长点进行重点扶持，新材料产业得到了快速发展，其中以长三角地区最为突出，位居全国七个新材料产业国家高技术产业基地之首，新材料产业值突破数万亿元，无论是技术水平还是产业规模都值得辽宁学习。新材料产业是战略性、基础性产业，也是高技术竞争的关键领域，我们要奋起直追，迎头赶上。

由辽宁省国家新型原材料基地建设工程中心、辽宁省新型原材料产业孵化基地、辽宁省新型原材料产业研究院主办的《辽宁新型原材料》，致力于宣传国家和省关于新型原材料有关扶持政策、及时让我省新型原材料企业及从业人员了解国内外新型原材料相关信息、新型原材料专业知识，共同研讨我省新型原材料发展中技术难题、加快我省新材料产业发展，优化传统产业升级，推动辽宁新材料工业向高端化、绿色化、智能化的方向发展。

《辽宁新型原材料》拥有强大的专家队伍、最前沿的国内外资讯、行业标准和公司动态等，整合各方资源，百家争鸣，成为新型原材料行业重要的交流与互动平台，为推动行业技术进步和行业健康发展提供信息指导。

主要栏目：

“技术应用”、“产业综述”、“政策解读”、“行业动态”、“大视野”等

发行范围：

辽宁省新材料相关企业

期刊形式：

大16开 48页

征稿范围：

来稿可以发表与新型原材料有关联的观点、评论、技术分析和发展趋势等等；可图文并茂，字数不限。《辽宁新型原材料》原则上只收原创性稿件，已在国内外刊物上发表或准备发表的文章须如实相告，将酌情刊登。

“十四五”开局之年， 航空航天行业

—新材料乘势而起



新材料地位日益凸显

2021是十四五的开局之年，作为整个军工产业链核心位置的新材料板块有望迎来较大的发展空间。20世纪是现代科学技术飞速发展的一个世纪，其中重要的标志之一就是人类在航空航天领域所取得的辉煌成就。进入21世纪，航空航天已展现出更加广阔的发展前景，高水平或超高水平的航空航天活动更加频繁。航空航天事业所取得的巨大成就，与航空航天材料技术的发展和突破是分不开的。

材料是现代高新技术和产业的基础与先导，很大程度上是高新技术取得突破的前提条件。航空航天材料的发展对航空航天技术起到强有力的支撑和保障作用；反过来，航空航天技术的发展需求又极大地引领和促进航空航天材料的发展。可以说，材料的进步对飞机的升级换代起到关键的支撑作用。

航空材料既是研制生产航空产品的物质保障，又是航空产品更新换代的技术基础。材料在航空工业及航空产品的发展中占有极其重要的地位和作用。进入21世纪，航空材料正朝着高性能化、高功能化、多功能化、结构功能一体化、复合化、智能化、低成本以及与环境相容化的方向发展。

1. 机身材料：轻质化、高强度

战斗机的高空、高速和高机动能力要求飞机的

结构选材必须保证足够的使用强度、刚度要求。根据《先进战斗机结构选材与制造工艺需求分析》（李航航等，2004年10月，高能束流加工技术国际研讨会），90年代后期出现了以美国F-22战斗机为代表的第四代战斗机，飞机结构采用翼身融合体结构、菱形机翼、外倾式双垂尾和大边条翼等；飞机结构材料虽然仍以金属材料为主，传统的钢材和铝合金材料的用量比例已经降低，总和不到20%。钛合金和复合材料用量均大大超过这一比例。F-22飞机这样选材的主要原因，一是为了减轻结构重量；二是为了满足高温条件下的结构使用强度要求；三是实现飞机结构的隐身要求等，该飞机的结构重量系数降到了27.8%。

材料具有较高的比强度和比刚度，就意味着同样质量的材料具有更大的承受有效载荷的能力，即可增加运载能力。结构重量的减少意味着可多带燃油或其他有效载荷，不仅可以增加飞行距离，而且可以提高单位结构重量的效费比。

不仅在军机领域，复合材料与钛合金在民机的不断迭代中也扮演重要角色。根据《从A350XWB看大型客机的选材方向》（陈亚莉，2009年2月，航空制造技术），在空客（AIRFP）与波音（BAUS）的客机中，复合材料与钛合金机体质量分数占比约为50%与15%。以飞机制造商空客为例，在A350XWB

大型民机中，复合材料的用量提升最快，在机身、机翼与尾翼上均有大量应用，全机结构质量分数为53%，相比上一代民机A380大幅提升31pct；同时，钛合金结构质量分数为14%，相比A380提升4pct。

2. 发动机材料：耐高温为主要发展方向

热力学第二定律指出所有热机的热效率均有一个上限值。热效率的上限和热机输入热的温度（热源温度）及热机的环境温度（冷源温度）有关。我们可以用卡诺循环来表示理想的热机循环热效率。

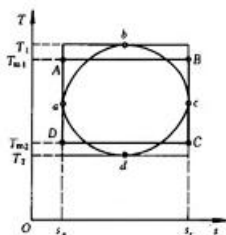


图1：热机卡诺循环热熵曲线

在卡诺循环中，当吸热量为 Q_1 ，放热量为 Q_2 时，循环所作净功为 $W_0=Q_1-Q_2$ ，根据卡诺循环的热熵曲线可得卡诺循环的热效率为： $\eta=1-T_2/T_1$ ，由此可以看出，热机的输入热源温度 T_1 越高，热机工作效率越高。因此，动力领域对工作温度要求的提升将带动相关材料的升级换代。

航空发动机涡轮入口温度需要不断提高。喷口温度从1300K提升到1610K时，涡轮输出效率可从46.40%提升到51.60%。这要求发动机材料的升级换代，同时原来那些可以使用合金钢的零件，如压气机盘和叶片等，也需要使用高温合金。

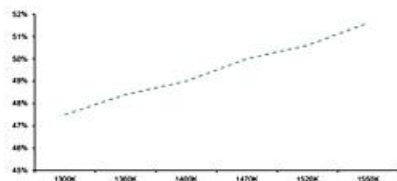


图2：涡轮入口温度越高，理论输出效率越高

军用航空发动机历经五代，推重比不断提升，高温合金、陶瓷基复材是核心材料。第一代涡扇发动机出现在20世纪50年代，以英国的康维发动机、美国的JT3D发动机为代表，推重比在2左右；第二代涡扇发动机出现在20世纪60年代，以英国的斯贝MK202和美国的TF30发动机为代表，推重比在5左右；第三代涡扇发动机出现在20世纪70-80年代，以美国的F100、欧洲的RB199和苏联的AL-31F发动机为代表，推重比在8左右；第四代涡扇发动机出现在20世纪90年代，以美国的F119和欧洲的EJ200发动机为代表，推重比在10以上；第五代涡扇发动机出现在21世纪初，以美国的F135和英、美联合研制的F136发动机为代表，推重比为12-13。未来航空发动机推重比将不断提高，美国已经开启第6代航空发动机的研发，预计推重比将达到16-18。

钛合金：性质优良的“万能金属”

1. 高性能航空耗材，形成“一超多强”格局

钛金属具有低比重和高比强度的特性，其合金在航空航天领域对于提升飞行器推重比有重要意义，近年来受到广泛使用。除军工、航空航天领域之外，钛合金还较多应用于化工、冶金、医疗、体育休闲等领域。钛产业链主要分为有色金属和化工涂料两条，有色金属链为：钛精矿→四氯化钛→海绵钛→钛锭/钛合金→钛材，化工涂料链为：钛精矿→四氯化钛→钛白粉。两个领域上游共用钛铁矿、金红石等资源。

全球钛材消费量与航空航天业的发展息息相关。自2000年以来，我国钛材需求主要集中在中低端的石油化工领域，随着2016年中国“十三五”规划的制定以及国防军队现代化的“三步走”战略的更新，航空航天领域用钛量不断提升。对于军用钛材而言，由于军工行业的特殊性，需接受国防科工局监管，采用严格的行政许可制度，对产品质量的要求更苛刻，在钛材“高均匀性、高纯净性、高稳定性”方面提出更高的要求。2019年中国钛材总消费量达6.9万吨，其中航空航天用钛量约为1.2万吨，占总消费量的17%。我们认为，虽然近年来中国

航空航天、船舶制造、海洋工程等高端用钛占比持续提升优化，但是与全球钛材需求结构相比，高端用钛占比依旧偏低，未来增量空间广阔。

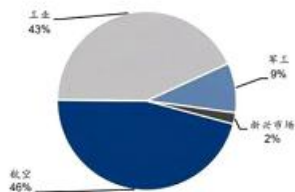


图3：2019年全球钛合金下游产量需求结构

2021年起中国“十四五”规划和军队现代化建设正式进入加速期，航空航天、军工装备等高端领域用钛大幅提升，2019年中国钛材总产量为7.5万吨，同比增长18%。从产品组成上来看，板材为主要产品，产量达3.9万吨，同比增加9%，占据钛材产量的52%。从供给结构来看，中国钛材制造企业呈现一超多强的局面。“一起”为中国钛企龙头宝钛股份（600456CH），“多强”包括西部超导（688122CH）、西部材料（002149CH）等公司。虽然中国高端钛材制造能力近年来高速发展，但仍无法完全满足下游军品钛材的旺盛需求，部分钛材仍需从乌克兰、哈萨克斯坦等国进口。2019年中国钛材总进口量达8116吨，小幅下滑7%。其中，技术要求较高的薄钛板、片、带常年处于净进口状态，2019年净进口1823吨，较2018年增长3%。

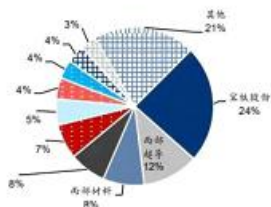


图4：2019年中国钛材制造企业产量格局

2. 军用市场：新机置换进行时，高端钛材市场广阔

目前中国军品钛材主要应用在军事战机，军用战机中钛合金主要应用于两个部位：

(1) 航空发动机：作为飞机的心脏，发动机不仅要承受极大的应力和高温，同时还要保证高推重比（推力/质量）。发动机压气机盘、叶片、高压压气机转子、压气机机匣等部件均采用钛合金材料。

(2) 飞机机体及紧固件：钛在中等温度下高强度、耐腐蚀、质量轻等特性完美满足机身用料的要求，起落架部件、大型锻造机翼结构件、机身蒙皮、隔热罩等均采用钛合金制造。同时飞机上采用许多碳纤维复合材料，钛合金与碳纤维增强的复合材料弹性模量匹配、热膨胀系数相近；并具有很好的化学相容性，不易发生电位腐蚀。

我国军机在数量上与美国存在较大差距，具有显著的总量提升需求。军用飞机是直接参加战斗、保障战斗行动和军事训练的飞机的总称，是航空兵的主要技术装备。据《World Air Forces2021》统计，截至2020年美国现役军机总数为13232架，在全球现役军机中占比为25%，而我国现役军机总数为3260架，在全球现役军机中占比仅为6%。按各个细分机型来看，战斗机是我国军机中的主力军，总数为1571架，但数量不到美国同期的60%，且其他机型的数量都远落后于美国，具有显著的总量提升需求。

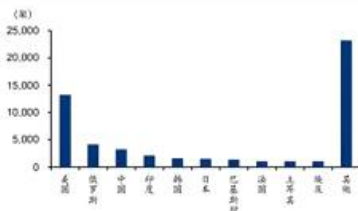


图5：2020年各国现役军机数量

3. 民用市场：亚太地区需求强劲，C919放量在即

●全球客机市场空间广阔，中国及亚太地区交付预计快速增长。

根据中国商飞公司市场预测年报（2020-2039），

2019年全球喷气式机队共有客机共23856架。从全球历史交付量而言，以空客为主的欧洲市场和以波音为主的北美市场占总市场的份额较大，分别占全球总份额的20.27%和27.99%。中国和亚太地区（除中国）分别占比16.62%和16.02%，中国已成为亚太地区接近半数以上的客机交付国家。预计2020-2039年中国及亚太地区将在民航领域快速发展，占据全球约41.6%的客机交付量。

据中国商飞预测，2020-2039年全球将有40664架新机交付，价值约5.96万亿美元，用于替代和支持机队的发展。其中，涡扇支线客机交付量为4318架，价值约为0.23万亿美元；单通道喷气客机交付量为29127架，其占交付总量三分之二以上，价值约为3.44万亿美元；双通道喷气客机交付量将达7219架，总价值约为2.30万亿美元。到2039年，预计全球客机机队规模将达44400架，是现有机队的1.86倍。

面对波音、空客公司高度占据市场的既有格局，受益于本土较大的需求空间，预计未来C919、ARJ21等机型将保持一定的追赶态势。根据中国商飞公司市场预测年报（2020-2039），预计2020-2039年中国将累计交付8725架新机，其中双通道客机占21.41%，共计1868架；单通道客机占比高达68.05%，共计5937架；余下10.54%为920架支线客机。2020-2039年，C919和ARJ21机型市场总规模将达到7320亿美元，约合人民币超4万亿。

与军用战机类似，民用客机中钛材同样应用于机体以及航空发动机两大部位。虽然钛合金结构占比整体低于军用战机，但由于空机质量大，单架客机钛材用量显著高于军用战机。根据《THE TRADE AND EMPLOYMENT IMPLICATIONS OF A NEW AIRCRAFT LAUNCH: THE CASE OF THE BOEING 7E7》(David Pritchard and Alan MacPherson, 2003年12月, Canada-United States Trade Center)，波音787梦幻客机钛合金结构占比达15%，机身钛合金用量约为8.5吨—10吨。中国首款具有自主知识产权的单通道涡扇喷气客机C919，机翼机体上共有二十多个钛合金零部件包括锻件、厚板、薄板、管材等，钛合金结构占比为9.3%，用量约为1.9吨。结合中国

商飞《民用飞机市场预测年报（2020-2039）》，2020-2039年C919大飞机（单通道客机）民用市场带来钛合金需求量约11280吨。根据中国航空新闻网，2021年第一架国产大飞机C919取得适航证后或将交付给东方航空公司，随着国产大飞机的正式交付，民用航空钛材市场将实现从“零”到“一”的飞跃。

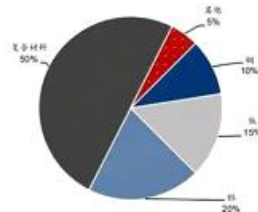


图6：波音787客机钛合金结构占比达15%

高温合金：重点关注军用发动机需求

1. 高温合金，为高温而生

传统钢铁在300℃以上会软化，无法适应高温环境。为了追求更高的能量转化效率，热机动力领域需要的工作温度越来越高。高温合金因此孕育而生，在600℃以上的高温环境中还可以稳定工作，并且技术不断进步。

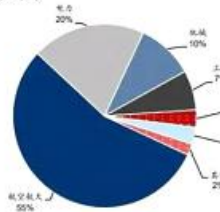


图7：2018年高温合金下游消费量结构

高温合金按合金的主要元素分为铁基高温合金、镍基。根据智研咨询，2018年以产品工艺区分，镍基高温合金产量占比为80%，铁基高温合金产量占比14.3%，钴基高温合金产量占比5.7%。

高温合金是航空发动机的关键材料。根据钢研高纳（300034CH）招股说明书，高温合金从诞生起

就用于航空发动机，是制造航空航天发动机的重要材料。发动机的性能水平在很大程度上取决于高温合金材料的性能水平。在现代航空发动机中，高温合金材料的用量占发动机总重量的40%~60%，主要用于四大热端部件：燃烧室、导向器、涡轮叶片和涡轮盘，此外，还用于机匣、环件、加力燃烧室和尾喷口等部件。

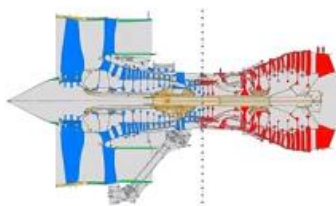


图8：先进航空发动机中关键的热端承力部件（图中红色部分）全部为高温合金

我国高温合金产业目前处于成长期，产业链企业未来发展空间广阔。我国高温合金生产企业数量有限，生产水平与美国、俄罗斯等国有较大差距，但近些年在产能与产值上皆有明显提升，炼石航空、西部超导等多家公司高温合金产能项目在建设投产中。

军用高温合金处于持续升级中，研发能力是高温合金企业的立足之本。以抚顺特钢、钢研高纳为首的国内老牌高温合金企业科研根基扎实。其中，抚顺特钢的变形高温合金市场和技术优势明显，而钢研高纳铸造高温合金国内顶尖、研发能力卓越。以万泽股份为代表的新兴高温合金企业，业务覆盖面广，同时也注重新型高温合金的研发。

2. 航空发动机用高温合金性能不断发展

●铁基高温合金：我国高温合金体系的一大特色

由于我国资源缺少钴，铁基高温合金的研制、生产和应用成为六七十年代的一道绚丽的风景线。根据《GH1040铁基高温合金》（刘哲等，2019年4月，热处理技术与装备）以及《高温合金-特殊

钢丛书》（黄乾尧，2000年4月，冶金工业出版社），大量应用至今的有GH1140、GH2135、GH1040等铁基合金。

铁基高温合金使用温度较低（600~850℃），一般用于发动机中工作温度较低的部位，如涡轮盘、机匣和轴等零件。但铁基高温合金中温力学性能良好，与同类镍基合金相当或更优，加之价格便宜，热加工变形容易，所以铁基合金至今仍作为涡轮盘和涡轮叶片等材料在中温领域广泛使用。

●镍基高温合金：变形/铸造/新型合金迭代升级

镍基高温合金一般在600℃以上承受一定应力的条件下工作，它不但有良好的高温抗氧化和抗腐蚀能力，而且具有较高的强度、蠕变强度和持久强度，以及良好的抗疲劳性能。主要用于航天航空领域高温条件下工作的结构部件，如航空发动机的工作叶片、涡轮盘、燃烧室等。

镍基高温合金按制造工艺，可分为变合金、铸造高温合金、新型高温合金。镍基铸造高温合金在发动机中主要用于涡轮导向叶片，工作温度可达1100℃以上，也可用于涡轮叶片，其所承温度低于相应导向叶片50~100℃。

随着耐热合金工作温度越来越高，合金中的强化元素也越来越多，成分也越来越复杂，导致一些合金只能在铸态上使用，不能够热加工变形。并且合金元素的增多使镍基合金凝固后成分偏析也严重，造成组织和性能的不均匀。采用粉末冶金工艺生产高温合金，就能解决上述问题。因为粉末颗粒小，制粉时冷却速度快，消除了偏析，改善了热加工性，把本来只能铸造的合金变成可热加工的变形高温合金，屈服强度和疲劳性能都有提高，粉末高温合金为生产更高强度的合金提供了新的途径。粉末高温合金主要用于制造高推比先进航空发动机的涡轮盘，也用于生产先进航空发动机的压气机盘、涡轮轴和涡轮挡板等高温热端零部件。

●钴基高温合金：抗腐蚀等特殊领域前景广阔

钴基高温合金的抗氧化性能较差，但其抗热腐蚀能力比镍好；钴基高温合金的高温强度、抗热腐蚀性能、热疲劳性能和抗蠕变性能也比镍基高温合金

更强，适用于制造燃气轮机导向叶片、喷嘴等。

我国由于资源限制，目前研制了K40、GH188和L605等钴基合金，使用范围有限。2001年以后，通用电气在钴基高温合金方面的研究主要集中在将钴基合金作为制备燃气轮机的基体材料，并在合金表面制备涂层如热障涂层以提高耐蚀性能。

由于材料方面的限制，钴元素在地球上储量较少，价格较为昂贵。目前钴基研究的热度有所下降，很多科研工作也停留在数字建模试验等理论阶段。

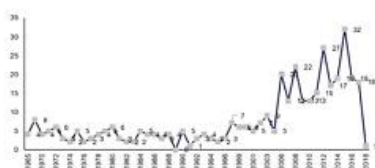


图9：钴基高温合金专利申请（件）趋势图

3.一代军机一代合金，发动机用高温合金或进入快速放量期

发动机对温度的要求不断提升。高推重比需要更高的喷口温度，需要工作温度更高的材料支撑。在世界高温合金的发展历程中，发动机叶片和盘件材料分别经历了变形、铸造、定向、单晶四个阶段。适应温度从600℃逐步提升至1100℃以上。

最新发动机的两片一盘的制备，取用的都是最先进的高温合金材料。涡轮叶片和导向叶片的结构材料以单晶高温合金和定向晶高温合金为主。由于叶片横截面都很薄，而横截面尺寸越小，蠕变断裂强度就越低，但是定向晶消除了易于形成裂纹的横向晶界，因此持久性能、冷热疲劳性能及薄壁性能大幅提升，而单晶由于消除了一切晶界，性能改善更加明显，蠕变断裂强度降低幅度最小，因此是目前最能满足叶片工作要求的材料。

我国涡轮叶片用高温合金从变形合金逐渐升级到单晶合金。

20世纪50年代，第一代发动机的推重比为3-4，燃气温度为800-1050℃，涡轮叶片材料选用使用温

度较低的变形镍基高温合金，其承温能力在700-900℃；20世纪70年代前后，第二代推重比5-6的发动机选用使用温度较同一成分变形高温合金高30℃左右的镍基铸造高温合金，其使用温度达950℃左右；到20世纪80年代，消除了横向晶界的定向凝固高温合金得到了广泛应用，其使用温度较同一成分等轴晶铸造合金高20-30℃，第四代发动机的叶片承温能力达980℃左右；20世纪90年代至21世纪初，第五代发动机采用了消除了一切晶界的镍基单晶高温合金，由于其使用温度又比定向凝固柱晶合金有进一步大幅度提高，最高温度可达1050-1100℃，因而得到了广泛应用。

军机的换代伴随着高温合金的升级。第一代涡喷发动机的核心材料是变形高温合金，核心材料工作温度650℃，到第四代的涡扇发动机，核心材料工作温度已经达到了1200℃，采用了单晶高温合金。历代军机的换代一直伴随着发动机核心材料—高温合金的升级。高温合金的升级需要研发的支持。在航空工业的发展需求牵引下，中国高温合金先后研制出了变形、铸造、等轴晶、定向凝固柱晶和单晶合金体系。上述高温合金的相继问世，不断地推动航空工业向前发展。据前瞻产业研究院发布的研究数据，发动机占军用飞机成本的25%，材料成本占发动机成本的50%，而高温合金占材料成本约35%。

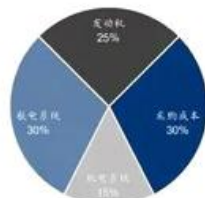


图10：2014年军用飞机成本拆分

根据华泰军工《航天军工：大国复苏，军工崛起》（2021年3月5日）报告，我国2021年-2030年新增军机合计约4940架，其中以歼10、歼11、歼15为代表的三代机新增1440架，以歼16为代表的三代半战斗机新增600架，以歼20为代表的四代机新

增800架。

根据以上假设，2021-2030年单发三代机共新增2040架，双发四代机共新增800架。根据美国安全研究中心发布的报告，美军三代战机F-15、F-16的制造成本分别为6500万和4000万美金。美军第四代战机F-22、F-35A、F-35C的制造成本分别为2.5亿、1亿、1.3亿美金。

我们以双发战斗机对标美军F35A、F15战斗机平均8000万美金造价；单发战斗机对标美军F16战斗机4000万美金造价；按美金:人民币=1:6.5，发动机成本占整机25%，原材料占发动机成本占比50%，高温合金占原材料成本35%计算，采购比1:1.2计算。2021-2030年军机扩编将带来高温合金规模约497亿人民币。

高温合金另一主要市场为发动机的维修换新。结合《World Air Forces 2021》，截至2020年我国歼10保有量260架，歼11保有量315架，歼15保有量45架，歼20保有量19架。考虑到军队的保密措施，我国战斗机实际数量或略高于《World Airforces 2021》保有量数据，我们预计到2030年，三代机与四代机的保有量预计在3000架左右，其中单发三代机约2000架，双发四代机约1000架。根据中国产业信息网预测，2019年军用飞机整机采购成本和生命周期内维修成本的比例接近1:1，我们假设发动机使用寿命为10年。战斗机售后维修成本中，发动机维修占比最高达到45%。其中双发战斗机对标美军F35A、F15战斗机8000万美金造价，单发战斗机对标美军F16战斗机4000万美金造价，按美金:人民币=1:6.5，发动机成本占整机45%，发动机1:1.2采购

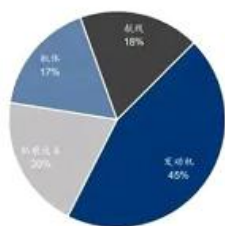


图11：2019年发动机维修成本拆分

比计算，2021-2030年军用发动机维修市场规模达到7020亿元。根据前瞻产业研究院发布的研究数据，原材料占发动机成本50%，高温合金占原材料比重70%，故2030年飞机保有量达到稳态后，我国高温合金年均维修市场规模约295亿人民币。

根据以上测算，2021-2030年军机列装扩编是军用高温合金市场的主要增量点，总规模约为497亿元，2030年军机换代基本完成后，维修需求是高温合金市场的主要贡献点，年均市场规模达到295亿元。我们假设2021-2030年军机列装数量平均分布，年均49.7亿元，那么2030年高温合金总市场规模约为345亿元。结合智研咨询，2020年我国高温合金市场规模达到231亿元，其中航空航天部分占比55%，约为127亿元。2021-2030年我国军用高温合金市场规模CAGR约为10.5%。

碳纤维：制造全环节技术壁垒高

1. 航空航天核心材料，技术壁垒较高

碳纤维是由有机纤维（主要是聚丙烯腈纤维）经碳化及石墨化处理而得到的微晶石墨材料纤维。碳纤维的含碳量在90%以上，具有强度高、比模量高（强度为钢铁的10倍，质量仅有铝材的一半）、质量轻、耐腐蚀、耐疲劳、热膨胀系数小、耐高低温等优越性能，是军民用重要基础材料，应用于航空航天、体育、汽车、建筑及其结构补强等领域。相比传统金属材料，树脂基碳纤维模量高于钛合金等传统工业材料，强度通过设计可达到高强度水平、明显高于钛合金，在性能和轻量化两方面优势都非常明显。然而碳纤维成本也相对较高，虽然目前在



图12：碳纤维材料下游应用情况

航空航天等高精尖领域已部分取代传统材料，但对力学性能要求相对不高的传统行业则更看重经济效益，传统材料依然为主力军。

碳纤维按不同的原材料分类，可以分为PAN基碳纤维、沥青基碳纤维或粘胶基碳纤维。PAN基碳纤维的原料来源丰富，且其抗拉强度比其他二者优越，因此PAN基碳纤维应用领域最广。根据智研咨询，2018年我国PAN基碳纤维产量份额占90%以上。沥青基碳纤维和粘胶基碳纤维的用途较为窄、产量小。通用级沥青碳纤维强度和模量较低，主要应用于保温材料领域；高性能沥青碳纤维多用于航空航天工程的工程材料。粘胶基碳纤维主要用于制作耐腐蚀和隔热材料。

现代碳纤维材料始于军用，目前航空航天为重要应用领域。现代的碳纤维是一种含碳量在90%以上的无机高分子纤维，具有良好的柔软性，且纵轴方向的强度很高，具有超强的抗拉力，属于新一代增强纤维，且碳纤维化学性质稳定，对高温耐受能力强，不易被腐蚀，是大型整体化结构的理想材料。与常规材料相比，碳纤维复合材料可使飞机减重，并有能力克服金属材料容易出现疲劳和被腐蚀的缺点。我国军用碳纤维产业链企业主要有中航高科、光威复材、中简科技等，其中中航高科偏下游，主要为航空复材产品；光威复材实现全产业链布局，为碳纤维产业龙头；中简科技布局偏上游，产品技术含量相对更高。

完整的碳纤维产业链包含从一次能源到终端应用的完整制造过程。从石油、煤炭、天然气均可以得到丙烯，目前低油价形势下，原油制丙烯的成本最优；丙烯经氨氧化后得到丙烯腈，丙烯腈聚合和纺丝之后得到聚丙烯腈（PAN）原丝，再经过预氧化、低温和高温碳化后得到碳纤维，并可制成碳纤维织物和碳纤维预浸料，作为生产碳纤维复合材料的原材料；碳纤维经与树脂、陶瓷等材料结合，形成碳纤维复合材料，最后由各种成型工艺得到下游应用需要的最终产品。

碳纤维制备过程中，质量过关的原丝是产业化的前提。碳纤维的强度显著地依赖于原丝的致密性

和微观形态结构，质量过关的原丝是实现产业化的前提，是稳定生产的基础。目前，比较常用的纺丝工艺是湿法纺丝、干湿法（干喷湿纺）纺丝。在致密性方面，干喷湿纺纺丝工艺是高性能碳纤维原丝的主流制备方法，且成本相比于湿法较低。据《PAN基碳纤维生产成本分析及控制措施》（马祥林等，2015年7月，纺织导报），在同样的纺丝装备及能源消耗条件下，干湿法纺丝的综合产量是湿法纺丝的2-8倍，PAN基碳纤维丝束的生产成本可降低75%。干喷湿纺中，纺丝液从喷丝孔喷出形成细流后，先经过一段空气层（1-20厘米），再进入凝固浴，在凝固浴中完成固化，可实现高速纺丝，用于生产高性能的纤维，同时具有干法和湿法的优点。干喷湿纺也是当前国际碳纤维巨头的主要纺丝方法，日本东丽（3402JP）的主流型号T700、T800、T1000碳纤维都是采用干喷湿纺制备而成。截止2019年，国内企业的碳纤维大部分仍采用湿法纺丝制备，顶尖龙头已成功掌握干喷湿纺工艺。

碳纤维技术发展至今已经历三代变迁，同时实现高的拉伸强度和弹性模量是目前碳纤维研制过程中的技术难点。近年来日美从两条不同技术路径在第三代碳纤维上取得技术突破，并有望在未来5-10年内实现工业化生产，对于提高战机、武器的作战能力意义重大。东丽利用传统的PAN溶液纺丝技术使得碳纤维强度和弹性模量都得到大幅提升，通过精细控制碳化过程，在纳米尺度上改善碳纤维的微结构，对碳化后纤维中石墨微晶取向、微晶尺寸、缺陷等进行控制。以当前东丽较为先进的碳纤维制品T1100G为例，T1100G的拉伸强度和弹性模量分别为6.6GPa和324GPa，比T800提高12%以及10%，正进入产业化阶段。美国佐治亚理工学院从原丝制备工艺入手，利用创新的PAN基碳纤维凝胶纺丝技术，通过凝胶把聚合物联结在一起，产生强劲的链内力和微晶取向的定向性，保证在高弹性模量所需的较大微晶尺寸情况下，仍具备高强度，从而将碳纤维拉伸强度提升至5.5~5.8GPa，拉伸弹性模量达354~375GPa。

2. 军用需求空间广阔，下游市场以CFRP为主
碳纤维复合材料是指至少有一种增强材料是碳

纤维的复合材料，其中最常见的是树脂基碳纤维复合材料（CFRP）。由于CFRP比强度、比弹性模量等机械性能，以及耐疲劳性、稳定性等相比传统材料有明显优势，因此在很多领域内对金属材料，尤其是轻质金属材料形成竞争取代的局面。CFRP应用场景广泛，在航空航天和体育休闲领域率先形成大规模市场，而随着21世纪以来碳纤维及其复合材料制造成本不断下降，在汽车制造、风力发电等领域应用比例在不断提高。

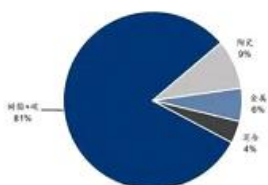


图13：2019年全球不同基体复合材料需求量占比

根据《2019年全球碳纤维复合材料市场报告》公布的数据显示，2019年中国碳纤维的总需求为37840吨，对比2018年的31000吨，同比增长了22%，其中，进口量为25840吨（占总需求的68%，比2018增长了17.5%），国产纤维供应量为12000吨（占总需求的31.7%，比2018增长了33%），2019年的中国市场的总体情况供不应求，无论是进口还是国产纤维。

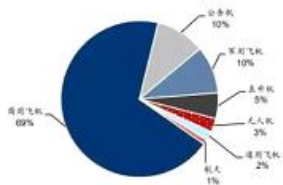


图14：2019年商用客机与军用飞机占航空碳纤维需求主导

同时，在航空航天领域中，商用飞机需求贡献最大，2019年商用飞机所需碳纤维达到1.62万吨，占比约70%。商用飞机碳纤维应用市场的影响因素主

要有三个：一是波音737系列停飞停产，国际航空器市场形成巨大的不确定性；二是新的单通道飞机平台，是否会同双通道飞机B787、A350一样，广泛地使用碳纤维；三是数量是双通道飞机10倍的单通道飞机，会采用何种复合材料工艺。

此外，根据《航空航天复合材料发展现状及前景》（唐见茂，2013年8月，航天器环境工程），军用旋翼机的螺旋桨及机体结构也大量使用复合材料，如V-22“鱼鹰”倾转旋翼机所用复合材料占结构质量的40%以上，包括机身、机翼、尾翼、旋转机构等，共用复合材料超过3000kg。欧洲最新批次的“虎”式武装直升机结构部件的复合材料用量高达80%，接近全复材结构。相对而言，军用运输机上复合材料用量不多，如C-17占8%、C-130J仅占2%，但空客A400M军用运输机上采用全复合材料机翼，复合材料用量占飞机空载时结构质量的35%。

我们根据美国三代机及以上机型数量测算，结合智研咨询预测，2021-2030年中国新增军机4940架左右，其中歼20空机重量18吨，生产800架，需求将达到1944吨，歼11空机重量10吨。此外，考虑军用直升机约600架，空机重量5吨；大型运输机及加油机等200架，空机重量60吨，碳纤维比例10%。按照结构重量占50%计算，同时参照智研咨询及《航空航天复合材料发展现状及前景》（唐见茂，2013年8月，航天器环境工程）对各型号军机碳纤维比例的统计，我们预计2021-2030年我国新增军机的碳纤维需求量约为6524吨。

3. 碳碳复合材料：新型刹车材料，军用市场前景明朗

碳/碳复合材料是以碳纤维为增强体，以化学气相沉积炭或树脂炭为基体的复合材料，主要用作刹车盘。刹车盘是以摩擦材料设计技术和制备技术为核心的刹车制动类产品，用于飞机、坦克装甲车辆和高速列车的刹车制动。

在“最严酷着陆停止”实验中，即考虑其他刹车系统都损坏的情况下，飞机机轮刹车可吸收超300兆焦耳能量，温度短时间内快速上升至千度以上，因此飞机对刹车盘材料耐高温性及稳定性、减少变形等方面都有严格的要求。



图15：刹车盘（碟）类产品在军用飞机和车辆上的应用

与刹车盘相比碳刹车盘的突出优点是：

(1) **减轻了刹车装置的重**：根据《C/C复合材料在制动系统的应用及发展》（程皓等，2020年3月，炭素），碳刹车盘的密度为 $1.75\text{g}/\text{cm}^3 \sim 1.80\text{g}/\text{cm}^3$ 左右，与金属刹车相比，可节省40%左右的结构重量。刹车力矩平稳，刹车时噪声小，飞机性能明显改善。

(2) **提高了刹车盘的使用寿命**：根据《C/C复合材料在制动系统的应用及发展》（程皓等，2020年3月，炭素），在同等使用条件下的磨损量约为金属刹车的 $1/3 \sim 1/7$ ，使用寿命是金属刹车的 $5 \sim 7$ 倍。一般军机上的使用寿命约1000次起落，客机的使用寿命2000~3000次起落。磨损到极限后，碳刹车盘还可以通过整体粘接、“二合一”铆接等修复方式进行维修，继续延长使用寿命，降低成本，提高经济性。

(3) **工作温度高**：根据《某民用飞机碳刹车动力实验》（张强等，2007年3月，江苏省航空航天学会飞行器专业委员会2007年学术年会），当使用温度上升到 775°C 时，碳/复合材料的比强度仍保持不变，钢材则有显著降低，钢刹车盘的最高使用温度不超过 900°C ，温度高于 900°C 时，钢刹车盘会发生粘结现象。碳/复合刹车材料在 2000°C 的高温下也不会熔化，不会发生粘结现象，也没有明显的翘曲变形。

(4) **刹车平稳**：碳刹车系统中的碳刹车机轮和防滑控制系统配合使用，可以保证恒定的打滑量并及时释放刹车能量，并且在高温下刹车盘也不易损坏，从而保证了刹车过程的平稳。

由于碳/复合材料具有密度低、耐高温、抗腐蚀、摩擦磨损性能优异、抗热振性好及不易发生

突发灾难性破坏等一系列优点，现已成为航空制动装置的首选刹车材料。现代的高性能民用客机，如波音747、波音757、波音767、空客系列、麦道系列等都采用碳/碳复合制动材料刹车装置。随着我国经济的不断发展和经济全球化的深入，整个航空业呈现出快速发展的趋势，国内营运机队数量及规模的不断扩大，给民航产品业务发展带来了巨大的机遇。而飞机刹车盘作为耗材，每次在磨损到标后都需要进行更换，市场需求量很大，目前主要依赖于进口。国外主要的碳刹车盘制造商有法国赛峰公司（SAFFP）、美国联合航空运输公司（UALUS）、霍尼韦尔（HONUS）与英国的美捷特（MGGLN）公司。国外公司（OEM件）采用短纤维模压工艺生产碳刹车盘，具有良好的摩擦磨损性能，但是其力学性能相对偏低。

为了进一步提高碳刹车盘的力学性能，以提升刹车材料及飞机的安全性，以北摩高科、西安制动为代表的国内公司采用整体针刺毡联合化学气相沉积工艺制备碳刹车盘，最终实现碳刹车盘国产化。

根据北摩高科招股说明书，军用飞机主机轮装配数量约为战斗机4个/架，加油机3个/架，运输机12个/架，武装直升机4个/架，教练机3个/架，结合智研咨询对我国军机2021-2030增量的预测，2030年新装机主机轮市场总容量有望达到48332余个。单价方面，由于国内该产品单价涉及国家机密暂未公开披露，我们参考国外航空设备采购网站skygec的碳/碳刹车系统（Aircraft Braking Systems 5011809-3 Carbon Brake）标价为15万美元，约合90万人民币。考虑到国产产品的成本优势以及国外刹车系统按组装完成后售卖，有一定的溢价，我们按照刹车盘+主机轮60万人民币/套的单价估算，2030年增量市场稳定后，预计军用飞机每年更换一次主机轮，2030年刹车系统市场规模有望达到290亿元。根据《World Air Forces 2021》，我国目前有维修价值的二代、三代战机和各类通用机型保有量约为3365架，按照北摩高科招股说明书的主机轮装配数量测算，2020年军机刹车主机轮需求约为21272套。2021-2030刹车系统市场规模CAGR约为8.6%。

高性能纸材料在航空航天、轨道交通、医药产业、食品等领域的应用

在新兴技术的推动下，传统的纸张已经被赋予了新的概念及功能，尤其是纸基功能材料的出现，极大地拓宽了纸材料的应用范围。纸基功能材料，是指以纸为基材，经过某种加工或特殊处理后具有一定功能的薄张材料，又被称为加工纸、特种纸或功能纸。相对于一般的印刷、包装、生活用纸，纸基功能材料需求量相对较少，针对某一特定性能，附加值较高，用途相对特殊。根据用途的不同，可大致分为包装和标签用纸、建筑装饰用纸、食品服务用纸、商务交流用纸、工业用纸、出版印刷用纸、消费类用纸、过滤用纸、安全类用纸、医疗类用纸及电气用纸。

纸基功能材料制造与技术创新主要分三类：①以纸张作为载体，在生产过程中加入具有热、电、光、磁等功能化学品，使材料具有特殊功能；②采用特殊纤维原材料，如芳纶纤维、碳纤维、陶瓷纤维等，通过特殊制造工艺赋予纸基材料新的性能；③对植物纤维进行物理或化学改性，使材料具有特殊使用性能。在航天、轨道交通等领域应用的新型纸材料主要是以特殊纤维原材料为基础，经特殊工艺制作而成新型材料产品。而相比之下，目前医药、食品领域的纸材料属于较为传统的纸材料类型，但结合了新型生物与材料技术的纸产品也在逐渐涌现。

（一）航空航天领域高性能纸材料应用情况

高性能纸材料在航空航天领域多用于飞机轻量化的关键架构减重材料、雷达罩材料等。而按照材料类型，航空航天领域内的纸材料多为芳纶产品，包括芳纶纸及芳纶纤维纸制造的蜂窝材料。其中芳纶纸是制造飞机雷达罩的理想材料，而芳纶纤维纸蜂窝材料，更是具备阻燃、耐腐蚀、高强度、轻量化、卓越的隔音降噪性等特点，且比强度是钢的9倍，且高于铝蜂窝，被用于飞机结构件材料。采用芳纶纤维与吸波性能优异的碳纤维，或宽频透波

性能优良的石英纤维等无机纤维混杂制作的纸基材料，也可以充分满足航空航天用轻质化要求。目前芳纶纸蜂窝轻质材料已经成功应用于国外飞机中，随着我国大飞机项目的推进，未来芳纶纸蜂窝将在我国迎来巨大的应用空间。

芳纶纸通常由芳纶短切纤维和沉析纤维（芳纶浆粕）按照一定比例经过湿法抄纸工艺成纸，再经热压、成型工艺后制成。其中，成纸中短切纤维主要起到增强作用，赋予芳纶纸较高的抗张强度和抗撕性能；沉析纤维则会影响芳纶纸的绝缘性能，提高成纸的介电性能。

芳纶纸主要有以下性能特点：①机械性能强韧，高拉伸及撕裂强度，耐磨性良好，并具有弹性和柔韧性，可再加工；②电介质强度优良，不添加其他树脂可承受1840kV/mm的短时间电应力；③耐高温性能良好，220℃放置10年，材料仍能保持良好机械性能和电性能；④化学稳定，耐强酸、强碱及绝大多数溶剂，防虫、防霉变；⑤能适应所有油漆、胶粘剂、变压器油、润滑油、制冷剂（-196℃的拉伸强度比室温高）；⑥对潮湿环境不敏感、抗辐射能力强（800MEGARADS的离子辐射8次，仍保持机械强度和电介质强度）；⑦阻燃且高温分解时无毒。

该材料最早由杜邦公司推出，主要有NOMEX和KEVLAR两大系列，其中NOMEX纸基材料起初常用于军事领域，被作为宽频高透率材料，应用于火控雷达天线罩、敌我识别器透波窗口、红外透波窗口等飞机和导弹的零部件中。目前我国芳纶纸基材料自给率不高，目前，国外供应商主要有美国杜邦、日本帝人等，尤其是杜邦在全球处于垄断地位。国内主要厂家有泰和新材、苏州圣欧以及广州彩艳，虽然国内企业对相关核心技术已经有所把握，但在市场份额上仍落后于国外巨头。



(二) 轨道交通领域高性能纸材料应用情况

与航空航天领域类似，轨道交通中应用高性能纸材料也是芳纶纸产品。2014年，国家发改委、财政部、工信部联合印发《关键材料升级换代工程实施方案》，将芳纶纸纳入“先进轨道交通行业急需材料”，而近年来随着我国高铁行业的迅猛发展，芳纶纸产品更是迎来了一轮良好的发展机遇。

依靠其高温防护、电绝缘、高温过滤等特性，芳纶纸蜂窝复合材料广泛应用在高铁及动车的地板、侧壁、天棚、窗户框、行李架和各种棚柜夹层等内部装饰上。

此外，随着我国城市轨道交通及铁路电气化的快速发展，对车载变压器、牵引变压器等相关列车设备也提出了更高的要求，而芳纶绝缘纸凭借其优于普通绝缘纸的性能被广泛应用于轨道交通领域，主要体现在材料减重方面。同时，采用纸板和芳纶绝缘纸制得的混合绝缘材料还可以作为变压器线圈的高温防护材料，我国成都铁路供电系统便采用了应用这种材料的整流变压器，大大降低了运营成本。



(三) 医药卫生领域高性能纸材料应用情况

医药卫生用纸材料主要分为功能性纸产品（医药类特种纸）以及包装用纸。功能性纸材料如止血纸、医用纸质胶片、吸油面纸、无尘纸、消毒剂浓度测量纸等。止血纸是以海藻类植物为原料的功能性用纸，因含有藻胶酸而具有止血功能；医用纸质胶片是随着医学影像学的变革发展而来的，在B超、彩超以及X光等部门中得到广泛的应用，除了满足医疗诊断需求，医用纸质胶片还应具有耐磨、防潮、环保等特点。

医用包装用纸包含医用纸塑类、医用皱纹纸

类、医用透析纸等。医用纸塑类用纸应符合医用纸包装材料的要求，塑料膜应由两层或多层复合而成，且无针孔类缺陷，适宜体积小、重量轻、单独包装、需通过包装材料观察到内部器械。医用皱纹纸是有纺织纤维或无纺纤维组成联结的纺织品，不包括矿物质纤维。具有抗水、低纤维屑、抗燃、良好的拉伸力和耐破度等特点，可应用于压力蒸汽灭菌及低温环氧乙烷灭菌。医用透析纸除了常规的包装特性外，还需发挥辅助灭菌的作用，医用透析纸可以是高温纸，也可以像特卫强医用包装材料一样涂胶使用。其中涂胶医疗透析纸被广泛用于十字孔塑料灭菌包装袋、纸/纸灭菌包装袋及纸/塑灭菌包装袋的生产上。

近年来，随着医疗水平与材料技术的发展，医药领域用纸制品的创新发展成为新的发展方向。如2017年，中国科学院上海硅酸盐研究所朱英杰团队研发出具有柔韧性和力学性能的新型羟基磷灰石超长纳米线基生物纸，可解决传统生物膜羟基磷灰石超长纳米线的含量问题，可调控生物纸的表面润湿性、膨胀率、水蒸气透过速率以及力学性能，可以作为皮肤创伤修复、骨裂或骨折包扎固定、骨缺损修复等用途的医用纸。



(四) 食品领域高性能纸材料应用情况

食品行业的纸制品主要用作包装使用，食品包装是用来防止来自生物、化学和物理等外界因素对食品造成损害的一类包装产品，此前用于食品包装的材料包含纸、金属、塑料及复合材料等。其中，纸制品是最有发展潜力的食品包装材料类型。随着环保、健康压力的增大，传统的羊皮纸、鸡皮纸、玻璃纸、普通食品包装纸等纸制品已经无法满足要求，以功能性纸制品和新型生物产品为原料的纸制品是未来的发展方向，这种功能性纸制品包括：太阳能转换为热能的纸；柔韧、高强、可食用的胡萝卜纸；可保持熟食的香鲜及热度的保温包装纸、食品防腐纸等。生物产品包装纸有豆渣可食包装纸、中草药果蔬保鲜纸、蛋白质涂层包装纸等。

新材料实现氢气提纯 “一步到位”

陶瓷膜是无机陶瓷材料经特殊工艺制备形成的非对称膜。因其稳定性好、强度大、效率高，可广泛应用于食品、饮料、植(药)物深加工、生物医药、发酵、精细化工等众多生产生活领域。

近日，中国科学院青岛生物能源与过程研究所研究员江河清与德国汉诺威大学合作，开发出一种新型钛基双相混合导体透氧膜。相较于传统铁基双相膜的化学不稳定性，钛基双相膜材料在含有水蒸气和高浓度氢气气氛下处理100小时，仍然保持原有的相结构和微观形貌，抗还原稳定性十分优异。

研究人员表示，这种新材料可以一步制备不含一氧化碳(CO)的高纯度氢气，后者可作为燃料直接用于氢燃料电池。相关成果日前发表于《德国应用化学》。

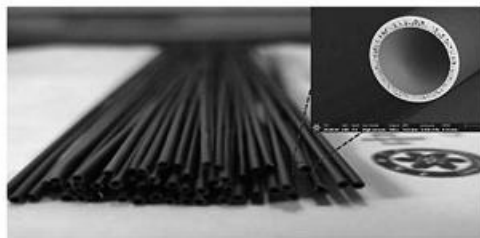
陶瓷透氧膜优越性明显

陶瓷透氧膜是一类同时具有氧离子—电子混合导电性的陶瓷膜，对氧气具有100%的选择透过性，相比传统技术具有明显优越性。

“以美国Air Products公司来说，该公司采用膜技术制氧，与传统的深冷技术相比，投资成本降低25%~30%，能量消耗则降低35%~60%。”江河清说。

此外，在化工生产中，利用膜反应器还可合并反应和分离这两个彼此独立的过程。“例如，可利用透氧膜一侧供氧方式实现膜另一侧天然气高效转化为合成气、乙烷、乙烯等高价值化学品，实现天然气的资源化利用。”江河清解释道。

基于此，美国能源部早在1992年就制订了Gas To Liquid(GTL)计划，设想通过膜反应器技术将甲烷转变为合成气，并先后成立了以Argonne国家实



中空纤维膜材料

验室和Air Products公司为首的研究团体。

氢作为一种可再生能源，被广泛应用于合成氨、石油炼制以及半导体生产和燃料电池行业中。以储量丰富的工业副产氢作为燃料电池的氢源，有利于解决燃料氢气存在的高成本和大规模储运问题。

然而，工业副产氢中含有微量的CO等杂质，会使燃料电池电极中毒失活，严重影响其操作稳定性，迫切需要发展全新、高效的制氢体系，以攻克工业副产氢分离纯化过程中面临的工艺复杂和氢气纯度低的难题。

“这种混合导体膜的制备成本低廉，工艺简单，实现了化工生产的过程强化，避免了复杂、高成本的分离纯化过程，在氢气分离制备领域有着广阔的应用前景。”江河清说。

让氢气分离技术更经济

“目前，制氢在工艺和技术上可分为四大主流：电解水制氢、化石燃料制氢、工业副产物制氢、生物质制氢。”江河清介绍，“电解水制氢可直接得到不含CO的燃料氢气，然而其成本高，不利于该技术广泛推广。化石燃料制氢等三类制氢技术成本虽然相对较低，但其产生的氢气并不能直接用作燃料氢气，主要原因是在生产过程中不可避免地产生CO，且必须经过后续分离纯化过程才能用于燃料电池。”

科技部在近日发布的“可再生能源与氢能技术”2020年度重点专项的考核指标中，明确提出燃料电池系统中氢气CO含量不超过0.2ppm，这也对制氢技术提出了新的要求。

据了解，目前，工业上通常利用变压吸附法分离提纯氢气，然而这种方法工艺复杂、能耗大，且在纯化过程中需要提供较高的压力，对整个制氢过程的安全性提出了很高要求。

不过，江河清指出，“采用膜分离技术可以将反应和分离耦合，一步直接得到不含CO的氢气，易于后期集成化操作，投资和占地面积较小，是一种更经济、更有前景的氢气分离技术”。

为安全性不懈探索

此前，江河清团队围绕透氧膜制氢相关技术已经开展了大量研究。基于江河清提出的耦合策略，该团队将水分解制氢与低碳烷烃催化转化耦合到膜两侧，一侧得到了不含CO的氢气，另一侧则得到了合成气和乙烯等高附加值产品，避免了复杂、高成本的分离纯化过程。

但是，在膜材料的测试过程中，随着时间延长，氢气分离性能逐渐降低。

“为了揭示其中的原因，我们对测试后的膜材料进行了全面表征，发现膜表面发生了较为严重的腐蚀破坏，特别是其中易变价的Co离子被深度还原而在膜表面析出，使得膜结构遭到了严重破坏。”团队成员贾露建表示，基于透氧膜实现燃烧反应驱动的水分解制氢过程中，透氧膜两侧均处于较为苛刻的强还原性气氛中，因此要求膜材料且有更高的化学稳定性。

贾露建解释Co、Fe其混合导体透氧膜材料由于其高透氧得到了广泛的关注和研究，但是它们在低氧偏压或还原性气氛下稳定性差，主要原因是Co³⁺和Fe³⁺长时间在低氧偏压或还原气氛下会被过度还原，从钙钛矿结构中析出，长期运行会导致膜的失效。“这也是我们探索开发在苛刻气氛下能够稳定运行的Ti基膜材料的初衷所在。”

此外，团队在膜材料密封中也遇到了一定的挑战。贾露建介绍，为了达到较好的密封效果，团队先后采用了玻璃粉、陶瓷粉、银丝、金丝等密封材料。因为密封的好坏直接影响水分解侧氢气纯度，因此，筛选优化不同密封材料是制备不含CO的氢气的非常关键的步骤。

通过对比不同材料并优化密封条件，团队发现利用银丝可以实现较好的密封效果，隔绝了低纯氢气侧杂质气体的泄漏扩散，同时避免氢气等高风险气体的泄漏风险，保证膜反应器的安全性。

一步制备高纯氢气

江河清表示，新开发的Ti基透氧膜材料解决了传统Co、Fe基透氧膜材料在反应与分离耦合过程中稳定性差的问题，因此，将Ti基膜材料构筑膜反应器应用于工业副产氢燃烧驱动的水分解制氢过程中，可以高效低成本地制备不含CO的氢气。

“我们开发的Ti基膜材料可以实现一步制备不含CO的氢气。”团队成员、中国科学院青岛生物能源与过程研究所副研究员张艳表示，具有氧离子电子混合导电性的致密陶瓷膜对氧气具有100%的选择透过性，将高温水分解反应和工业副产氢燃烧反应耦合在陶瓷透氧膜反应器的两侧，低纯氢气的燃烧可以促进陶瓷膜另一侧水分解生成氧气的原位移除，从而可以促进水高效分解，获得不含CO的氧气，直接用于气燃料电池。

由于氧气以氧离子的形式通过氧空位传递，透氧膜对其他气体具有出色的拦截功能，这种特性决定了水分解侧获得的氢气纯度在理论上可以达到无限高。

“Ti基膜材料在强还原气氛下展现出优异的稳定性。我们根据Ti离子在还原气氛中不会发生深度还原的特点，设计合成了Ti基双相透氧膜材料，解决了传统Co和Fe基混合导体膜在还原气氛下不稳定的问题。该研究展现了Ti透氧膜材料在制氢领域的独特优势。”张艳补充说。

基于所研发的Ti基膜材料，江河清团队成员进一步采用相转化法和挤出成型工艺分别制备了中空纤维膜和管状膜。与片状膜相比，膜面积和氢气透量均显著提高。

目前，该团队正积极开展中空纤维膜和管状膜组件的安装调试。“将来有望应用于工业副产氢提纯分离，促进推动膜分离制氢技术的商业化应用。”江河清说。