

行业研究/深度研究

2019年02月11日

行业评级:

航天军工 增持(维持)
航天军工II 增持(维持)

王宗超 执业证书编号: S0570516100002
研究员 010-63211166
wangzongchao@htsc.com

何亮 执业证书编号: S0570517110001
研究员 heliang@htsc.com

邱乐园 执业证书编号: S0570517100003
研究员 010-56793945
qiuleyuan@htsc.com

刘曦 执业证书编号: S0570515030003
研究员 025-83387130
liuxi@htsc.com

金榜 执业证书编号: S0570517070008
研究员 021-28972092
jintang@htsc.com

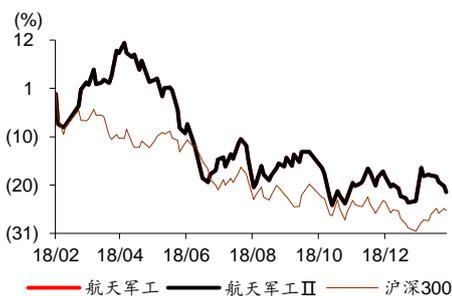
王维 01056793945
联系人 wangwei011620@htsc.com

尹会伟 +86 10 56793930
联系人 yinhuiwei@htsc.com

相关研究

- 1《高德红外(002414,买入): 18 年报业绩预上修, 增长拐点来临》2019.01
- 2《雷科防务(002413,买入): 拟收购恒达微波, 布局雷达产业链》2019.01
- 3《航天军工: 国防军工高端装备迎历史机遇》2019.01

一年内行业走势图



重点推荐

股票代码	股票名称	收盘价(元)	投资评级	EPS(元)				P/E(倍)			
				2017	2018E	2019E	2020E	2017	2018E	2019E	2020E
300395.SZ	菲利华	16.80	买入	0.41	0.55	0.74	0.96	40.98	30.55	22.70	17.50
603678.SH	火炬电子	16.20	买入	0.52	0.84	1.03	1.3	31.15	19.29	15.73	12.46
300699.SZ	光威复材	39.70	增持	0.64	1.06	1.4	1.76	62.03	37.45	28.36	22.56
300263.SZ	隆华科技	3.97	买入	0.05	0.11	0.16	0.24	79.40	36.09	24.81	16.54

资料来源: 华泰证券研究所

军工复材需求旺盛, 投资价值凸显

军工复材产业链深度报告

军工复材产业处于成长期, 具备中长期投资价值

军工复材技术发展至今已逐渐成熟, 在国产武器装备中的应用越来越广泛, 应用比例也正逐步提升, 而且我们认为, 未来仍有较大提升空间。在混改、价格改革、军民融合、院所改制等改革快速推进和航空航天产业链迎来快速发展的行业背景下, 军工行业下游对军工复材的需求有望快速增长。结合产业周期发展的特点, 我们认为军工复材产业目前正处于成长期, 行业内企业利润率水平较高且市场需求旺盛, 具备中长期投资价值。

我国新一代武器装备复材应用比例提升明显, 并已用于主承力结构件

伴随着武器装备的不断发展, 对减重、隐身、耐冲击、耐高温等性能要求越来越高, 传统材料越来越难以满足多项要求, 复材成为军事装备发展的重要基础, 其应用水平也已成为衡量武器装备发展的先进性标准之一。美国与日本是较早开展复材制备与应用的国家, 技术较成熟, 在武器装备与民用航空中应用比例较高, 且已经应用于主承力结构件。随着国内装备不断发展, 复材制备技术的逐步成熟, 新一代装备中复材应用比例也在不断提升, 如四代机复材用量占结构件比例达 20%, 而三代机不到 10%。

改革进程推进叠加装备批产放量, 军工行业下游对复材需求或将增长迅速

我们认为, 随着军工改革的深入和军改后订单的补偿性释放, 以及新武器装备成熟后加速列装订单放量, 下游军工行业对碳纤维、碳化硅纤维、石英纤维及其复材的需求有望快速提升, 带动军工复材企业收入及利润增长。从已经发布业绩预告的公司来看, 军工上游原材料企业利润增长较快, 有一部分原因是民品业务的好转, 但主要原因是军工业务的增长较大, 从产业链传导的角度看, 上游军工材料企业的收入及利润快速增长也预示着下游需求正在提升。

军工复材行业壁垒较高, 行业内企业普遍毛利率较高、盈利能力较强

军工复材产业中民参军企业较多, 是竞争较为充分的市场, 但由于技术难度高、前期投入大、进入下游周期长等原因, 导致行业壁垒较高, 目前大批量为军工行业配套复材的企业数量不多, 军工复材企业毛利率较高, 军品占比高的复材企业毛利率水平基本在 40% 以上, 盈利能力较强。未来军品定价机制改革以及军民融合政策的逐步推进, 我们认为可能会加大军工复材行业竞争, 降低毛利率水平, 但具备核心竞争力的企业仍会保持优势。

投资建议: 优选具备核心竞争力且基本面好、高增长、低估值标的

经过近年的连续下跌, 中信军工指数已重回 14 年牛市起点, 整个板块估值水平下移明显。在军工板块中, 军工复材企业由于盈利能力较强, 目前相对其他军工子行业具备较强的低估值优势。我们认为, 伴随着新一代武器装备的批产上量, 未来下游军工行业对复材的需求有望持续增长, 建议关注具备核心竞争力、基本面好、业绩增速较高、且估值较低的优质军工复材个股, 如菲利华、火炬电子、光威复材、隆华科技等。

风险提示: 军费增长、改革进度不达预期, 武器装备研制及生产进度不达预期。

正文目录

一、军工复材产业链投资价值分析.....	6
二、复材性能优异，在国内外国防领域应用越来越多.....	9
复材技术与武器装备发展相辅相成，我国仍有较大提升空间.....	9
国外军机复材应用比例较高，国内相比仍有较大应用空间.....	10
复材在战斗机上应用比例逐步提升，且已经能够用作主承力结构件.....	10
直升机机体和桨叶使用复材比例较高.....	13
无人机应用复材比例较高，普遍高于有人战斗机.....	14
民航客机复材应用比例不断提升，国内 C919 应用复材占比达 12%.....	15
复材在航天装备上主要用于减重和防热.....	16
战术及战略导弹.....	17
运载火箭.....	17
卫星.....	18
复材在舰船领域的应用.....	19
复材在陆军装备中的应用.....	21
三、碳纤维：军用需求旺盛，未来增长潜力较大.....	23
按原材料不同分为三种，其中 PAN 基碳纤维占据主流.....	23
PAN 基碳纤维.....	24
沥青基碳纤维.....	26
粘胶基碳纤维.....	26
PAN 基碳纤维按力学性能不同分为三类，在国防领域应用各有侧重.....	28
日美 PAN 基碳纤维技术及产业化处于领先地位.....	29
我国 PAN 基碳纤维研发起步不晚，但目前与国外存在较大差距.....	31
碳纤维增强复合材料在国防领域应用广泛.....	34
碳纤维增强树脂基复合材料应用较广，已用于承力结构件.....	34
碳纤维增强炭基复材主要用于飞机刹车盘及航天耐烧蚀材料.....	35
碳纤维增强其他基体复材种类较多，部分在国防领域取得了应用.....	36
碳纤维军用需求旺盛，未来增长潜力大.....	37
四、碳化硅纤维：打破封锁实现量产，有望开启下游广阔空间.....	38
碳化硅纤维按耐温性能可分为三代.....	38
先驱体转化法是目前工业化制备 SiC 纤维的主要方法.....	39
日本率先开展研究，我国与美德同期起步，但进展同比落后.....	42
日本企业是全球 SiC 纤维主要生产厂，国内工业化生产处于起步阶段.....	44
SiC 纤维增强复合材料制备技术逐渐成熟，促进产品应用.....	46
目前主要用于制备高温结构复材、高温隐身材料和先进核能材料.....	46
国产纤维量产及复材制备技术逐渐成熟，有望开启下游广阔市场空间.....	48
五、石英纤维：航空航天产业发展，带动需求快速上升.....	49
石英纤维主要用作雷达罩透波及航天器隔热材料.....	49

石英纤维是高性能机载雷达罩常用的增强纤维之一	49
石英纤维在导弹天线罩中应用广泛，国内外仍在不断改进提升	51
石英纤维可应用于航天器作为热防护材料	51
菲利华是国内唯一的石英纤维规模化生产企业	52
航空航天产业发展，有望带动石英纤维需求提升	53
六、国内军工复材产业链重点公司	54
菲利华：专注高端石英，半导体及军工下游需求增长潜力大	54
光威复材：民族之光引领碳纤产业发展，军民两端应用前景广阔	55
中简科技：军用 ZT7 碳纤维核心供应商，积极开发其他类型碳纤维	56
火炬电子：军用 MLCC 核心供应商，布局新材助腾飞	57
隆华科技：业务转型升级，外延布局军工复材	58
楚江新材：铜加工龙头，积极布局高端装备和军工材料	59
中航高科：航空复材与高端制造双轮驱动，军民融合前景广阔	60

图表目录

图表 1： 复合材料被多个国家专项列为发展重点	6
图表 2： 军工行业上游材料企业 2018 年业绩增长较为显著	6
图表 3： 典型军工复材企业研发支出占收入比例	7
图表 4： 典型军工复材企业毛利率水平	7
图表 5： 军工复材行业重点企业利润增速及 PE 估值预测	8
图表 6： 复合材料的性能优势	9
图表 7： 复合材料分类（按所用基体不同分）	9
图表 8： 复合材料在国内外军用飞机上应用比例逐渐提升	10
图表 9： 复合材料在军用飞机结构件的典型应用示例	10
图表 10： 复合材料在军用飞机上应用的发展历程	11
图表 11： 部分军机的复合材料应用情况	11
图表 12： B-2 隐身战略轰炸机的复合材料使用比例高达 50%	12
图表 13： 复合材料在 F-22 上的应用比例达 25%	12
图表 14： 部分国内飞机的复合材料使用情况	12
图表 15： 各代直升机主要技术特征及复合材料应用情况	13
图表 16： NH-90 复合材料应用情况	13
图表 17： 复合材料在无人机上的应用示例	14
图表 18： 复合材料在无人机应用的发展历程	15
图表 19： 复合材料在波音和空客飞机上的应用	15
图表 20： A350XWB 中复合材料的使用情况	16
图表 21： 导弹蒙皮温度计算公式	16
图表 22： 不同飞行速度下导弹表面温度（假设导弹环境温度 220K）	16
图表 23： 复材在战略导弹及其发射装备上的应用示例	17
图表 24： 复合材料在国外运载火箭上的应用	18
图表 25： 复材在我国运载火箭上的应用	18

图表 26: 复合材料在卫星上的应用	19
图表 27: 复材在国内卫星上的应用	19
图表 28: 瑞典维斯比级护卫舰舰体使用了复合材料	20
图表 29: 美国 DDG1000 驱逐舰上层建筑使用了复合材料	20
图表 30: 复材在舰艇上的典型应用	20
图表 31: 复合材料在民用高性能船艇上也有应用	21
图表 32: 美国坦克和装甲车复合材料部件	22
图表 33: 复合材料枪托	22
图表 34: 复合材料弹匣	22
图表 35: 国际碳纤维行业发展历程	23
图表 36: 碳纤维的分类	23
图表 37: 三种碳纤维性能比较	24
图表 38: PAN 原丝生产工艺流程	24
图表 39: PAN 基碳纤维的制备过程	24
图表 40: 不同纺丝工艺对比	25
图表 41: 湿法纺丝与干喷湿纺工艺对比	25
图表 42: 市售 PAN 基碳纤维和沥青基碳纤维强度和模量对应值	26
图表 43: 粘胶基碳纤维生产流程	27
图表 44: 日本东丽公司不同类型碳纤维性能对比	28
图表 45: 日本东丽公司碳纤维发展历史关键事件	29
图表 46: 美国 HEXEL 公司碳纤维牌号与性能	30
图表 47: 2017 年全球主要碳纤维企业理论产能情况	30
图表 48: 2017 年全球主要碳纤维市场需求细分	30
图表 49: 国产 T300/T700/T800 级碳纤维以及具备替代进口能力	31
图表 50: 我国 PAN 基碳纤维生产厂家及研究单位分布图	32
图表 51: 2006-2017 年我国 PAN 基碳纤维理论产能 (吨)	32
图表 52: 国内典型碳纤维企业情况介绍	33
图表 53: 我国军用碳纤维产业链	34
图表 54: 碳纤维复合材料在国外部分战斗机上的应用	34
图表 55: 碳纤维增强树脂基复合材料在国外航天领域的应用	35
图表 56: 炭/炭复合材料的应用	36
图表 57: 炭/炭复合材料产品示例	36
图表 58: 常见复合材料增强纤维及其耐温性能	38
图表 59: 碳化硅纤维发展至今已发展出 3 代	39
图表 60: SiC 纤维及其制品产业链	39
图表 61: 制备 SiC 纤维的常用方法	40
图表 62: 先驱体转化法工艺流程	40
图表 63: 先驱体转化法中不同技术方向能制备不同类型的碳化硅纤维	41
图表 64: 用电子束和氧化法生产碳化硅纤维的比较	41
图表 65: 国外企业研制生产的三代 SiC 纤维	42
图表 66: 国外先驱体转化法制备碳化硅发展历程	43

图表 67: 国防科大研发的三代 SiC 纤维.....	43
图表 68: 国内先驱体转换法制备碳化硅发展历程.....	44
图表 69: 赛力菲发展历程.....	45
图表 70: 宁波众兴发展历程.....	45
图表 71: 连续 SiC 纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料主要制备工艺比较.....	46
图表 72: SiC 基复合材料在航空发动机上的应用.....	47
图表 73: SiC 纤维作为高温隐身材料的应用.....	48
图表 74: SiC 纤维在先进核能领域的应用.....	48
图表 75: 棒拉丝法生产石英纤维产品的工艺流程.....	49
图表 76: 石英纤维各种产品在军工领域用途.....	49
图表 77: 机载及弹载雷达天线罩常用透波纤维及性能.....	50
图表 78: 石英纤维在高超声速飞行器上的应用.....	52
图表 79: TUFROC 防隔热一体化复合结构示意图.....	52
图表 80: 石英纤维纱.....	53
图表 81: 石英纤维三维纺织预制件.....	53
图表 82: 国内军用石英纤维及其制品产业链.....	53
图表 83: 菲利华营业收入及增速.....	54
图表 84: 菲利华归母净利润及增速.....	54
图表 85: 光威复材营业收入及增速.....	55
图表 86: 光威复材归母净利润及增速.....	55
图表 87: 中简科技营业收入及增速.....	56
图表 88: 中简科技归母净利润及增速.....	56
图表 89: 火炬电子营业收入及增速.....	57
图表 90: 火炬电子归母净利润及增速.....	57
图表 91: 隆华科技营业收入及增速.....	58
图表 92: 隆华科技归母净利润及增速.....	58
图表 93: 楚江新材营业收入及增速.....	59
图表 94: 楚江新材归母净利润及增速.....	59
图表 95: 中航高科营业收入及增速.....	60
图表 96: 中航高科归母净利润及增速.....	60

一、军工复材产业链投资价值分析

我国军工复材产业目前正处于成长期，我们认为未来整体盈利水平有望呈现出持续上升的态势。根据行业生命周期理论，行业从出现到完全退出社会经济活动需要经历幼稚期、成长期、成熟期和衰退期四个阶段。军工复材技术发展至今已逐渐成熟，在武器装备中的应用越来越广泛，应用比例也越来越高，如我国四代机复材应用量占结构重量比例已达20%，伴随着下游军工产业发展，军工复材需求有望快速增加，从事军工复材研制生产的企业也越来越多。军工复材产业目前具有需求高速增长、技术渐趋定型、产业竞争状况愈发明朗、企业进入壁垒较高等特点，结合产业周期发展的特点，我们认为军工复材产业目前正处于成长期，行业企业具有较高的利润率及较旺盛的市场需求。

军工复材发展历程就是一个不断突破国外封锁的过程，是国家近年重点支持、鼓励发展的产业之一。由于碳纤维、石英纤维、碳化硅纤维及其复材应用领域特殊，以及对武器装备性能提升明显，在发展之初均面临国外的技术和设备封锁，导致初期发展较为困难。经过一段时间技术积累后，在国家重大计划及政策的扶持与牵引下，即实现了快速突破。例如，我国碳纤维的研发始于20世纪60年代，初期由于技术、体制、经费等原因进展缓慢，本世纪初在“863计划”碳纤维技术研究专项及国防科工局“一条龙”项目牵引下，国产碳纤维开始快速发展。2016年8月工信部发布《高端装备创新工程实施指南（2016-2020年）》，指南中重点推出的大飞机专项、航空发动机及燃气轮机专项、节能与新能源汽车专项、高档数控机床专项等均将复合材料列入发展重点之一。我们认为，我国军用复材技术发展多年，已经具备较好基础，未来伴随着这些专项计划的逐步实施，有望进一步加快复合材料的技术提升以及应用推广。

图表1：复合材料被多个国家专项列为发展重点

重点专项	子项	与复合材料相关的内容
大型飞机专项	大型飞机材料研制与应用工程专项	建设以先进复合材料、铝合金、钛合金为主的大型飞机主干材料体系和工程应用体系；持续提升产品竞争力，提高材料自主保障能力。
航空发动机及燃气轮机专项	航空发动机先进材料与制造应用示范工程专项	建设基于钛合金、高温合金、先进复合材料的航空发动机骨干材料和工艺体系，满足研制周期和经济可承受性要求
节能与新能源汽车专项	整车控制、驱动系统、整车轻量化等产业关键共性技术突破专项	研发非金属材料、高强度轻质合金、高强度钢等轻量化材料的车身、零部件，突破车用碳纤维原材料成型、在线编制、模压成型等先进工艺技术，开展轻量化材料加工及整车、零部件成型生产和检测能力
高档数控机床专项	航空航天领域高档数控机床应用示范专项	推进高档数控机床在航空航天装备大型结构件制造与装配中的应用，包括用多轴联动龙门数控铣床、五坐标蒙皮镜像加工机床加工复合材料结构件等。

资料来源：工信部，华泰证券研究所

图表2：军工行业上游材料企业2018年业绩增长较为显著

公司名称	军品相关业务	2018年业绩情况	业绩预告说明
光威复材	碳纤维	归母净利润同比增长 55%~65%	2018年公司军品业务稳定增长
菲利华	石英纤维	归母净利润同比增长 20%~50%	2018年公司受军工、半导体行业市场增长拉动，相关领域营业收入较同期继续增长
中航高科	航空复材	归母净利润同比增长 270%左右	2018年复合材料业务收入呈现稳定增长态势，净利润同比增加约5100万元
江苏天鸟	纤维编织	2018年业绩承诺同比增长 55.56%	2018-2021年业绩承诺：扣除非经常损益后分别不低于净利润6000万元、8000万元、1亿元、1亿元，同比增长55.56%、33.33%、25%、0
隆华科技	舰船复材、PMI泡沫材料	归母净利润同比增长 162%~183%	新材料业务板块按照公司总体战略规划和产业布局，实现快速增长
宝钛股份	钛合金	归母净利润同比增长 598%~691%	2018年公司持续强化管理提升效益，进一步优化产品结构，提升产品质量，营业收入同比上升
钢研高纳	高温合金	归母净利润同比增长 63.26%~92.47%	2018年公司销售规模扩大、工艺技术提升，致使毛利率提高

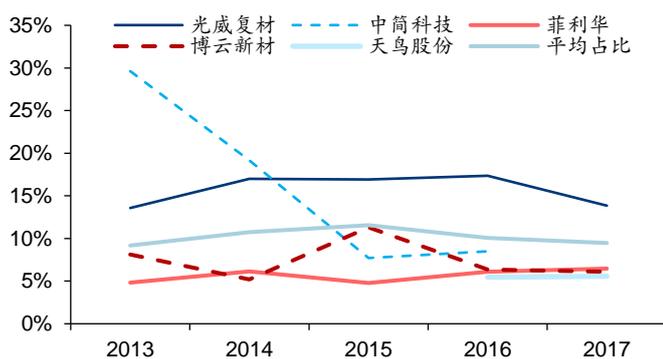
资料来源：公司公告，华泰证券研究所

2016和2017两年受军改及国企改革影响军工行业企业收入及利润整体增速不高，2018年军工上游企业业绩增速较高，或预示下游军工行业需求快速增长。随着军改主要编制调整完成，实施科技兴军战略须加快新武器装备的批产、加速淘汰老式装备，加之补偿性订单，军工行业下游需求或将增长迅速。从已经发布业绩预告的公司来看，上游军工原材料企业2018年利润普遍增长较大，或预示着下游军工行业需求的提升。例如，从事军用碳纤维生产的光威复材业绩预增55%~65%；从事军用钛合金生产的宝钛股份业绩预增598%~691%；从事军用高温合金生产的钢研高纳业绩预增63.26%~92.47%；从事复材生产的中航高科业绩预增270%，其中复材业务净利润同比增加约5100万。我们认为，上游原材料企业利润的增长有一部分原因是民品业务的好转，但主要原因是军工业务的增长较大，从产业链传导的角度看，上游军工材料企业的收入及利润快速增长也预示着下游需求正在提升。

复合材料在新一代武器装备中的应用比例提升明显，伴随着下游军工产业发展以及改革落地，军工复材需求有望快速增长。由于军用复材技术的进步，以及新一代装备对减重、隐身等性能要求较高，我国新一代武器装备复材应用比例相比上一代装备提升明显，据2014年发表的《先进复合材料在军用固定翼飞机上的发展历程及前景展望》文献，我国三代战斗机、复材用量占结构重量比例在10%左右，四代机占比达20%。我们认为，随着军工改革的深入和军改后订单的补偿性释放、以及新武器装备成熟后加速列装订单放量，下游军工行业对军用复材的需要有望快速提升，带动军工复材企业收入及利润增长。

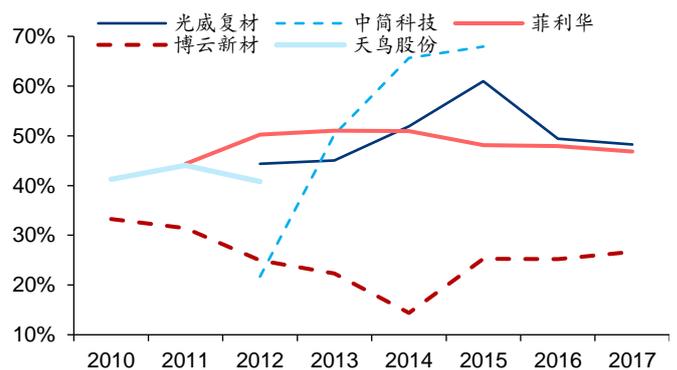
军工复材行业壁垒较高，行业内企业普遍毛利率较高、盈利能力较强。军工复材产业中民参军企业较多，我们认为竞争较为充分的市场，但由于技术难度高、前期投入大、进入下游周期长等原因，导致行业壁垒较高，目前大批量为军工行业配套复材的企业数量不多，但也正因为行业壁垒高，目前的军工复材企业毛利率较高。例如，最初竞争军用碳纤维配套的单位较多，但目前大批量给军工行业提供碳纤维的企业仅光威复材及中简科技2家；光威复材从2001年就开始了碳纤维技术研究，2005年底突破百吨级工程化关键技术，截至目前已经持续高投入研发18年，2013年以来研发支出占收入比例处于13.5%~17.5%之间；几家典型的军工复材企业毛利率均较高，军品占比高的企业毛利率水平基本在40%以上。

图表3：典型军工复材企业研发支出占收入比例



资料来源：公司公告，华泰证券研究所

图表4：典型军工复材企业毛利率水平



资料来源：公司公告，华泰证券研究所

军品定价机制改革以及军民融合政策的逐步推进，可能会加大军工复材行业竞争，降低毛利率水平，但具备核心竞争力的企业仍会保持优势。我们认为，定价机制改革及军民融合政策推进，对效率低、技术含量低、成本高的受垄断保护企业将会产生不利影响，尤其传统的靠体系保护的配套类企业可能受到较大影响，但由于军品研制周期长、配套保障连续性等特点，改革的冲击有个过程，会有个推进的过程。而军工复材领域大多数是技术实力较强、具备核心竞争力的企业，本身就处于竞争较为充分的市场，军工复材企业大部分是凭借自身的技术实力成为配套单位的，我们认为，未来军工复材行业竞争有可能会加强，行业毛利率水平有可能会逐步下降，但有核心竞争力的企业仍会保持优势。

建议关注具备核心竞争力、基本面好、业绩增速较高、且估值较低的优质军工复材个股。军工行业受改革影响，2016年初至今整体收入和利润增长缓慢，订单和业绩直至2018年才开始逐季恢复，叠加流动性和贸易摩擦等影响，军工板块下滑较大，中信军工指数已重回14年牛市起点，整个板块估值水平下移明显。在军工板块中，军工复材企业由于盈利能力较强，目前相对其他企业具备较强的低估值优势。我们认为，伴随着新一代武器装备的批产上量，未来下游军工行业对复材的需求有望持续增长，建议关注具备核心竞争力、基本面好、业绩增速较高、且估值较低的优质军工复材个股，如菲利华、火炬电子、光威复材、隆华科技、楚江新材、中航高科等。

图表5：军工复材行业重点企业利润增速及PE估值预测

股票简称	归母净利润（百万元）				归母净利润增速			PE		
	2017	2018E	2019E	2020E	2018E	2019E	2020E	2018E	2019E	2020E
菲利华	121.78	164.5	221.14	288.1	35%	34%	30%	30.55	22.70	17.50
光威复材	237.2	389.85	515.66	649.32	64%	32%	26%	37.45	28.36	22.56
火炬电子	236.77	380.18	467.66	586.25	61%	23%	25%	19.29	15.73	12.46
隆华科技	46.01	112.87	156.51	247.06	145%	39%	58%	33.08	23.35	14.70
楚江新材	360.63	450.8	546.5	680.01	25%	21%	24%	11.17	9.20	7.33
中航高科	83.57	310	347	389	271%	12%	12%	31.45	27.68	24.71

备注：中航高科由于暂未覆盖，数据来自Wind一致预期，其他个股数据均来自华泰证券研究所近期发布的个股研报

资料来源：Wind，华泰证券研究所；数据日期：2019年2月3日

二、复材性能优异，在国内外国防领域应用越来越多

复材技术与武器装备发展相辅相成，我国仍有较大提升空间

复合材料是指由有机高分子、无机非金属或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料，它既能保留原有组分材料的主要特色，又通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联与协同，从而获得原组分材料无法比拟的优越性能。

图表6：复合材料的性能优势

性能优势	描述
可设计性强	材料的力学、热、声、光、电、防腐、抗老化等性能都可按照构件的使用或服役环境条件要求，通过组分材料的选择和匹配以及界面控制等材料设计手段最大限度地达到预期的目的
各向异性	可以通过合理的设计消除材料冗余，最大程度发挥材料及结构的潜力和效率
材料与结构一体化	结构的整体性好，大幅度减少零部件和连接件数量，降低成本，提高可靠性
复合效应	能通过复合克服单一材料的某种性能缺陷
多功能性	复合材料组成的多样性和随意性为复合材料具有除力学性能以外的许多功能创造了条件，使其拥有吸波、透波、耐热、防热、隔热、导电、记忆、阻尼、摩擦、阻燃、透析等功能

资料来源：航空复合材料技术，华泰证券研究所

图表7：复合材料分类（按所用基体不同分）



资料来源：《航空复合材料技术》，华泰证券研究所

复材早期主要作为功能件应用于武器装备，目前已经能够用做主承力结构件。复材从 20 世纪 60 年代开始在军事装备中取得应用并暂露头角，早期由于价格高、产量低、某些性能不高，主要作为功能件，使用量不大。例如，这一时期玻璃纤维增强复合材料开始用于军用飞机的整流罩、襟副翼等位置；美国的“北极星”战略导弹开始使用玻璃钢复材；巡逻炮艇的甲板室也开始使用复合材料。随着设计/制造工艺技术的完善、发展和创新，复合材料成本不断下降，性能不断提升，生产规模不断扩大，目前已经能够作为主承力结构件，在航空、航天、兵器、舰船等多个军工领域获得了重要应用。

伴随着武器装备的不断发展，对减重、隐身、耐冲击、耐高温等性能要求越来越高，传统材料越来越难以满足多项要求，复材成为军事装备发展的重要基础，其应用水平也已成为衡量武器装备发展的先进性标准之一。现代高科技战争要求武器装备具有快速反应、高机

动、突防一体化、远程精确打击等特点，促进了武器装备从结构到功能的飞跃转变，复合材料具有高比强度、高比模量、耐高温、抗腐蚀、耐疲劳、材料结构功能一体化、设计制造一体化和易于成型大型构件的特点，在武器装备的减重、耐冲击高强度防御、耐高温、隐身等领域得到广泛应用，促进了武器装备的轻量化、高性能、功能化以及智能化，已成为发展高技术武器的重要物质基础之一，同时近年来复材技术不断取得突破，成本的下降使得复材应用更为广泛。总的来看，复材技术与装备发展相辅相成，互相促进，即复材制备与应用技术发展推动了装备升级，装备不断发展也倒逼了复材技术不断进步。随着国内外复合材料的设计与加工能力逐步上升，成本进一步下降，未来复合材料在武器装备的应用将会进一步提升。

美国与日本是较早开展复材制备与应用的国家，技术较成熟，在武器装备与民用航空中应用比例较高。据2015年发表的《复合材料在新一代大型民用飞机中的应用》文献，美国F-35战斗机复合材料应用比例达到35%；大型民用客机B787及A350XWB分别达到结构重量的50%和52%；美国新型军用运输机ACCA则以整体模成型的方式建造飞机，整个飞机机体复合材料比例高达65%，整机减重甚至可达25%以上。

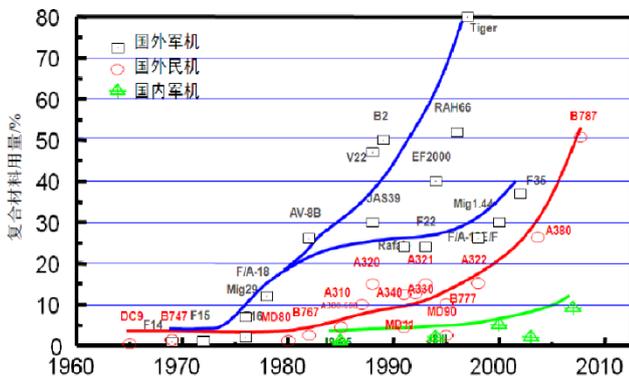
随着国内装备不断发展，复材制备技术的逐步成熟，装备中复材应用比例也在不断提升，但总体水平与国外仍存在差距，未来仍有较大提升空间。据2014年发表的《先进复合材料在军用固定翼飞机上的发展历程及前景展望》文献，我国四代机复材应用比例占整机结构件的20%左右，而国外先进战斗机复材应用比例可达35%；我国大型舰船尚未采用复合材料上层建筑，美国已在DDG1000型驱逐舰的前2艘采用了复材上层建筑，大幅提升了舰艇隐身能力。

国外军机复材应用比例较高，国内相比仍有较大应用空间

复材在战斗机上应用比例逐步提升，且已经能够用作主承力结构件

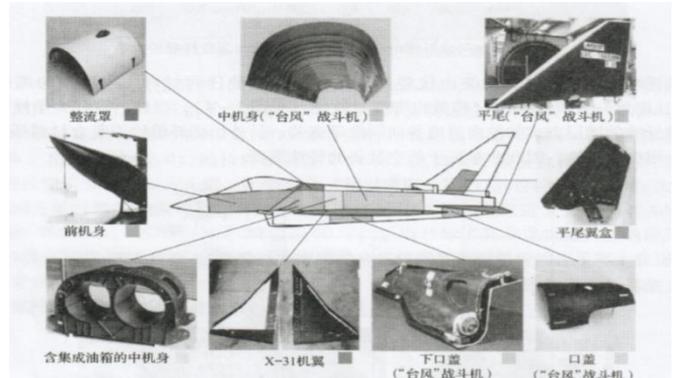
随着增强材料、基体以及复材制备技术发展，复合材料在军用飞机上的用量逐步提升，据2006年发表的《飞机结构用先进复合材料的应用与发展》文献，2000年以后世界先进军机上复合材料的用量占全机结构重量的20%~50%不等。复材在国外军用战斗机上的应用经历了“小受力件→次承力件→主承力件→起落架应用”4个阶段，从初期只能应用于受力较小的部件，发展到目前已经能够应用于主承力结构件以及起落架上。

图表8：复合材料在国内外军用飞机上应用比例逐渐提升



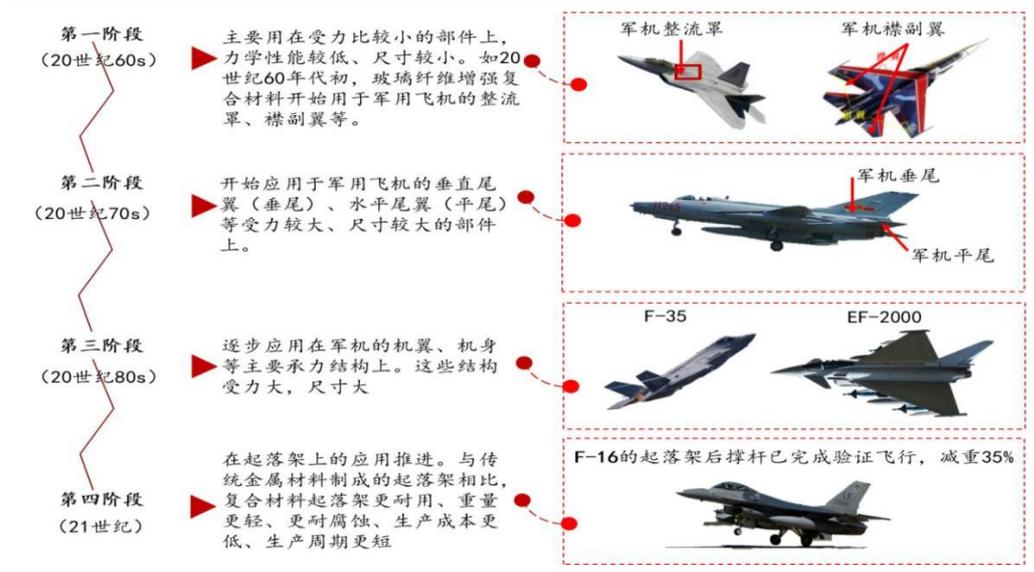
资料来源：中航工业复合材料技术中心，华泰证券研究所

图表9：复合材料在军用飞机结构件的典型应用示例



资料来源：航空复合材料技术，华泰证券研究所

图表10： 复合材料在军用飞机上应用的发展历程



资料来源：先进复合材料在军用固定翼飞机上的发展历程及前景展望，华泰证券研究所

- 第一阶段，主要用在舱门、口盖、整流以及襟副翼、方向舵等受力比较小的部件上。** 20世纪60年代初，玻璃纤维增强复合材料开始用于军用飞机的整流罩、襟副翼等。这个时期复合材料的力学性能相对而言还比较低，所制造的航空制件的受力水平相应较小，制件尺寸也较小。
- 第二阶段，复合材料开始应用于军机的垂直尾翼、水平尾翼的壁板等次承力结构件上，这一阶段复材应用比例可达5%。**如美国F-14战斗机在1971年把碳纤维增强的环氧树脂复合材料应用于平尾上，成为复合材料发展史上的一个里程碑。此后，连续碳纤维增强的复合材料应用于F-15、F-16、米格-29、幻影2000、F/A-18等飞机的尾翼上。自20世纪70年代初至今，国外军机尾翼级的部件均已用复合材料制造，一般如果一架军机的垂尾、平尾全部采用复合材料，则这些部位的重量可占结构总重的5%左右。

图表11： 部分军机的复合材料应用情况

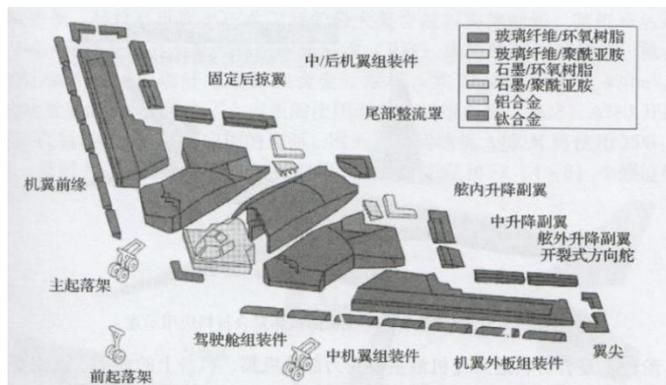
机种	首飞时间	国别	用量/%	应用部位
“阵风”	1986	法国	30	垂尾、机翼、机身结构的50%
JAS-39	1988	瑞典	30	机翼、垂尾、前翼、舱门等
F-22	1990	美国	25	机翼、前中机身、垂尾、平尾及大轴
“台风”	1994	英国、德国、意大利、西班牙	40	机翼、前中机身、垂尾、前翼
F-35	2006	美国	35	机翼、机身、垂尾、平尾、进气道
B-2隐身战略轰炸机	1989	美国	50	机翼、机身、垂尾、尾部整流罩、后掠翼

资料来源：航空复合材料技术，华泰证券研究所

- 第三阶段，复合材料逐步应用在军机的机翼、机身等主要承力结构上，复材应用比例达20%~50%。**美国原麦道飞机公司于1976年率先研制了F/A-18飞机的复合材料机翼，并于1982年进入服役，把复合材料的用量提高到了13%，成为复合材料应用发展史上的又一个重要的里程碑。此后，国外军机群起仿效，世界各国所研制军机的机

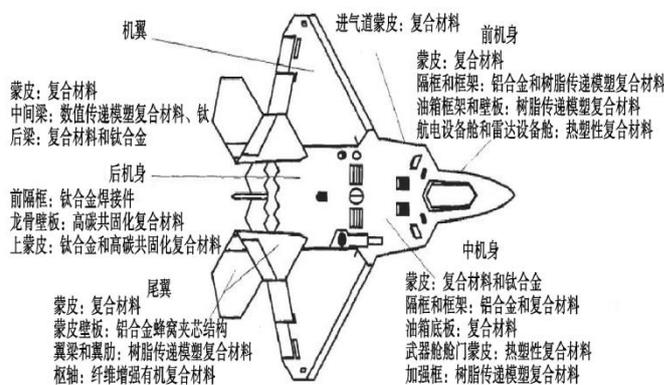
翼一级的部件几乎无一例外地都采用了复合材料，如美国的 AV-8B、B-2、F/A-22、F/A-18E/F、F-35，法国的“阵风”，瑞典的 JAS-39，欧洲英、德、意、西四国联合研制的“台风”，俄罗斯的“金雕”等，目前世界先进军机上复合材料用量占全机结构重量的 20%~50%不等。

图表12: B-2 隐身战略轰炸机的复合材料使用比例高达 50%



资料来源：航空复合材料技术，华泰证券研究所

图表13: 复合材料在 F-22 上的应用比例达 25%



资料来源：先进复材在军用固定翼飞机上的发展历程及前景展望，华泰证券研究所

4. **第四阶段：复合材料在起落架上的应用**，由于在起落架上的应用是替代钢件而不是铝件，因此进一步提升了减重空间。与传统金属材料制成的起落架相比，复合材料起落架更耐用、重量更轻、更耐腐蚀且生产成本更低。此外，复合材料起落架的生产周期更短，通常只需 2~3 个月，而很多传统金属材料起落架的交付时间却长达 2 年。目前美国 F-16 战斗机的复材起落架后撑杆已完成验证飞行；法国“阵风”战斗机也在起落架上使用碳纤维复合材料。

我国四代机之前，复材的应用范围仅限于尾翼、鸭翼等次承力结构上，用量占比不到 10%，四代机复合材料用量有了明显突破，复材用量达到整机结构件的 20%左右。复合材料在国内军用飞机的设计研究工作起步并不算晚，自 20 世纪 60 年代末 70 年代初起，国内相关单位相关科研人员就着手于将先进复合材料应用于国内战斗机上，先后开展了歼-8 和某型强-5 的尾翼和前机身的复合材料应用研究工作。此后新设计的军机上都采用了复合材料，如歼-10 战机用量占到 6%，歼-11 战机用量占到 9%，但一般均未超过 10%。最新研制成功的四代战机复合材料用量有了较明显的突破，复合材料用量占到了整机结构件的 20%左右，并且将目标用量增加至 29%。

图表14: 部分国内飞机的复合材料使用情况

机型	首飞时间	复材用量	应用部位
强-5	1985年	1%-2%	垂尾、前机身
J-8 I	1985年	1%	垂尾
J-8 III	1993年	2%	垂尾、前机身
J-8 II	1995年	5%	机翼承力结构验证
J-10	1997年	6%	垂尾、鸭翼、襟副翼
J-11B	2003年	9.6%	机翼、平尾、垂尾、减速板
Y-12F	2010年	7%-10%	副翼、方向舵、升降舵、整流罩
J-20	2011年	20%	机翼、起落架局部、蒙皮局部

资料来源：先进材料在航空航天中的应用、航空航天工程材料，华泰证券研究所

直升机机体和桨叶使用复材比例较高

复材在直升机上的使用，促进了直升机技术的飞跃，机体结构复合材料用量现已成为衡量新一代直升机技术先进水平的重要标志之一。纵观近代直升机的发展进程，直升机经历了两次重大技术飞跃。第一次技术飞跃为20世纪60年代涡轴发动机的应用，第二次技术飞跃为20世纪70年代复合材料的应用，复材旋翼桨叶在直升机上的应用，不仅使桨叶的寿命大幅提升，而且可以实现桨叶优化设计，显著改善了旋翼气动性能。20世纪70年代研制的第三代直升机几乎都采用了复合材料旋翼桨叶，80年代以来研制的第四代直升机还在机体结构中大量采用复合材料，用量已占到结构质量分数的35%~50%，近年来甚至出现了全复合材料直升机，复合材料在旋翼系统和机体结构上的大量使用成为第三和第四代直升机的主要技术特征。

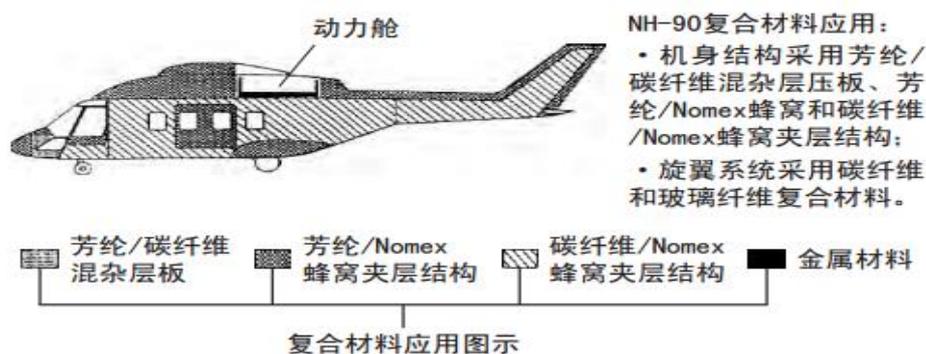
图表15： 各代直升机主要技术特征及复合材料应用情况

	第一代直升机	第二代直升机	第三代直升机	第四代直升机
研制年代	1940-1950年代	1960-1970年代	1970-1980年代	1990年代以后
动力装置	活塞式发动机	第一代涡轴发动机	第二代涡轴发动机	第三代涡轴发动机
旋翼系统	金属/木质混合结构桨叶与金属铰接式桨毂旋翼	全金属桨叶与金属铰接式桨毂旋翼	复合材料桨叶与弹性轴承、柔性组件桨毂旋翼	高性能复合材料桨叶与无铰式、无轴承式球柔性铰式等新型桨毂旋翼
机体结构	钢管焊接桁架式结构或铝合金半硬壳式结构	主要为铝合金半硬壳式结构	机体结构部分使用复合材料，约占结构质量分数10%	机体机构大量采用复合材料，部分机型复材占比达50%以上
桨叶寿命	<600h	≥1200h	≥3000h	≥6000h
代表机型	米-4、S-51	UH-1、米-6	S-70、AH-64	RAH-66、NH-90

资料来源：直升机复合材料应用现状与发展，华泰证券研究所

近年复材在国外直升机中的应用也越来越多，部分机型复材占机体结构重量比达50%以上，甚至产生了全复合材料机体直升机（NH-90直升机），复材占比高达95%。复合材料具有轻质、高比强度、高比刚度及可设计性强等优点，将其用于直升机结构上，可有效实现结构减重，提高飞行性能、安全性和可靠性，因此近几十年来复材在直升机上的应用比例越来越高。据2016年发表的《直升机复合材料应用现状与发展》文献，RAH-66科曼奇直升机机体采用了大量的碳纤维/环氧、芳纶/环氧和蜂窝芯材，占机体结构重量的54%；NH-90直升机复材用量占比高达95%，采用了全复合材料机体，仅动力舱平台及其隔板采用金属件，其余全部采用碳纤维复合材料、芳纶复合材料和NOMEX蜂窝芯材，旋翼系统采用了碳纤维复合材料和玻璃纤维复合材料，与全金属结构相比，零件数量减少20%，质量减轻15%，生产成本降低10%。

图表16： NH-90 复合材料应用情况



资料来源：直升机复合材料应用现状与发展，华泰证券研究所

我国直升机复材应用研究较早，目前国内在研和在役直升机均大量使用复材。20世纪80年代开始研发的直-9型直升机就大量采用了复合材料，主要用于主桨叶、涵道大垂尾、平尾、侧端板、座舱罩等结构部件。直-11型直升机旋翼桨叶和尾桨都采用了全复合材料结构型式，桨毂星形柔性件和夹板均采用复合材料结构。直-10、直-19武装直升机上也大量使用碳纤维材料制作的机身框架结构、直升机旋翼、机翼蒙皮和直升机尾翼部件。目前，国内在研和在役直升机均大量采用复合材料，主要应用部位有旋翼桨叶中的大梁、蒙皮、垫布、后缘条等，机体结构中的机身下构件蒙皮、座舱、动力舱整流罩、短翼、尾梁蒙皮、壁板、尾斜梁、尾段整流罩、仪表板、遮光罩等。

无人机应用复材比例较高，普遍高于有人战斗机

为了尽可能减重，无人机大量应用了复材，且用量普遍高于有人战斗机，一般在60%~80%之间。无人机具有低成本、轻结构、高机动、大过载、长航程、高隐身的鲜明技术特点，这些特点决定了其对减重有迫切的需求，复合材料的出现使无人机的减重要求得以实现。据2013年发表的《先进复合材料在军用无人机上的应用动向》文献，各种无人机上复合材料的用量较大，普遍要高于有人机，一般在60%~80%之间，有的甚至全结构均使用复合材料。复合材料在无人机机体上的应用发展经历了从整流罩，到承载小的部件，例如飞机翼面的前缘、后缘壁板，到翼面的操纵面或操纵面的后缘等次承力结构，以及到主承力结构，进而到翼面盒段、翼身融合等整体一体化成型的发展历程。

图表17： 复合材料在无人机上的应用示例



X-45A无人机（美国波音公司，2002年）翼展10.3 m，弦长8m，空重3640kg，搭载有效载荷能力为680kg，复合材料占X-45A结构重量的45%。其机身由高速切削的铝合金龙骨、梁及隔框覆以复合材料蒙皮构成。



X-47A“飞马”无人攻击机（美国格鲁门公司，2003年）高度翼身融合且无垂尾的无人机，机长和翼展均为8.5m，飞机空重1740kg。整个机体除一些接头采用铝合金外，几乎全部采用先进复合材料。



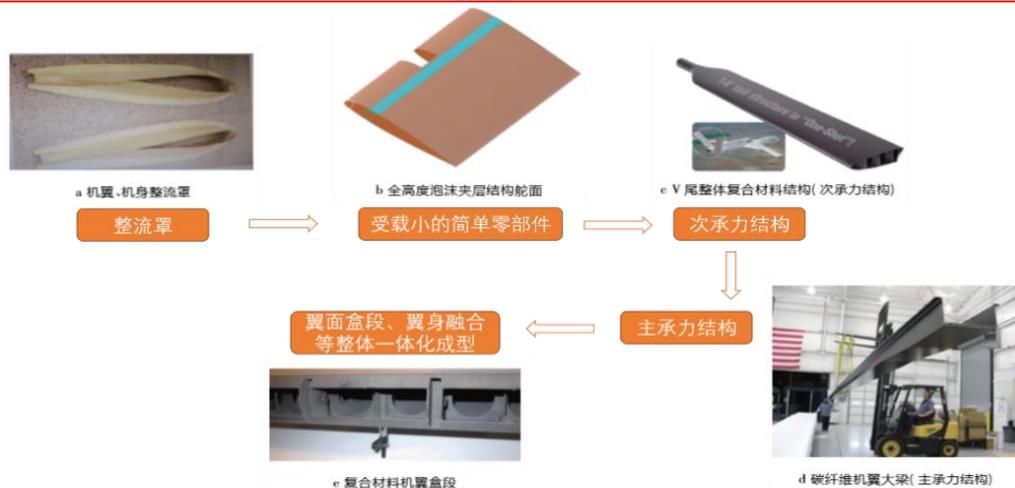
“雷电之神”无人机（英国BAE系统公司，2010年）整个机身除主梁和发动机机舱使用金属材料外，其它部分均由碳纤维和石墨等先进复合材料构成。



“神经元”无人机（法国牵头，欧洲多国合作开发，2011年）“神经元”无人机采用了飞翼布局，以钛、铝合金为骨架，外层则大量使用了碳纤维/环氧树脂之类的先进复合材料，具有高度的低可探测性。

资料来源：复合材料在无人机上的应用与展望，华泰证券研究所

图表18: 复合材料在无人机应用的发展历程



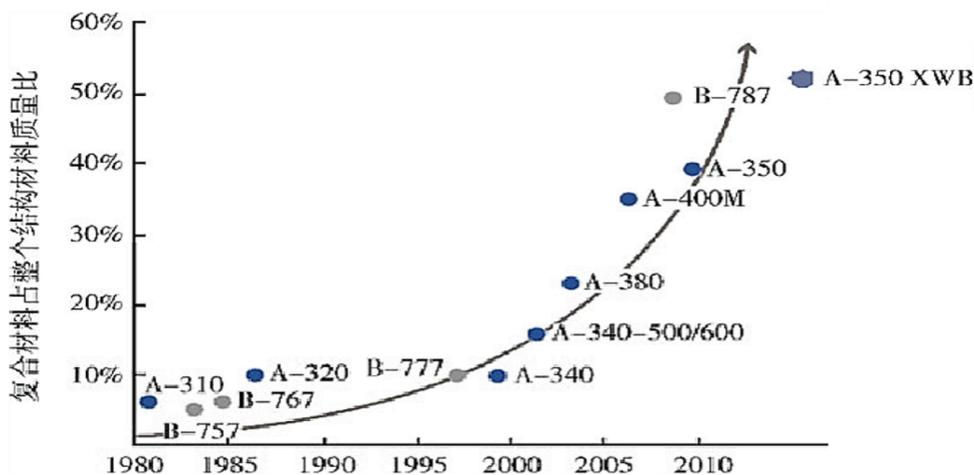
资料来源: 复合材料在无人机上的应用与展望, 华泰证券研究所

复合材料在我国多型无人机上也获得了较大应用。哈飞与北航联合设计的 BZK-005 型远程无人侦察机机身受力骨架采用常规铝合金铆接结构, 蒙皮及整流罩采用玻璃纤维、碳纤维、纸蜂窝等复材, 机翼由全复合材料构成。“翔龙”无人机侦察机大量采用了复合材料, 机身上曲线连续而光滑, 机身尾部背鳍上装有复合材料发动机舱, 使得其雷达散射截面面积大约为 1m², 具有较好的隐身性能。“翼龙-1D”是中国新一代改良型多用途无人机, 机身结构采用了全复合材料。

民航客机复材应用比例不断提升, 国内 C919 应用复材占比达 12%

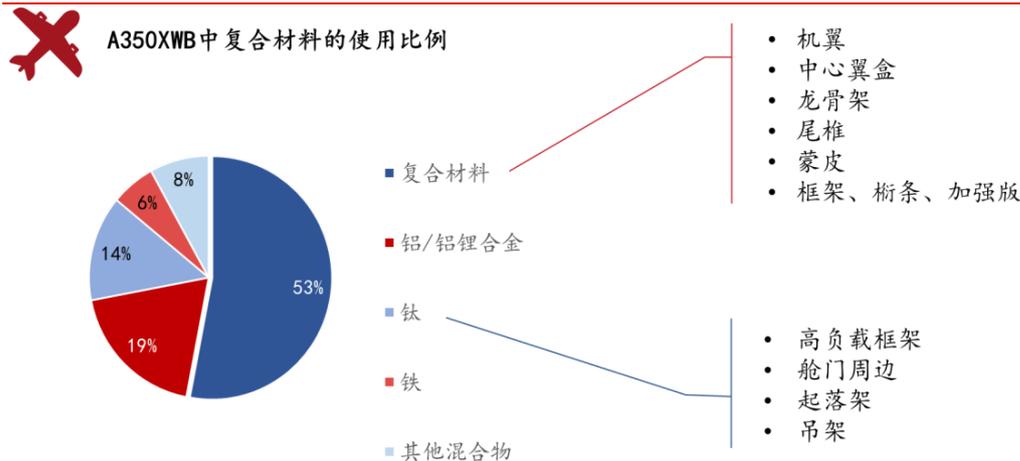
民机既强调安全性也强调经济性, 对结构减重同样有迫切的需求, 复材用量也在不断提升, 应用占结构材料质量比可达 50%。波音 B787 飞机 (2009 年 12 月首飞) 复合材料用量达 50%, 主要应用在机翼、机身、垂尾、平尾、机身地板梁、后承压框等部位, 是第一架采用复合材料机翼和机身的大型商用客机。A350XWB (2013 年 6 月首飞) 是目前复合材料用量占全机结构重量比例最大的一种客机, 复合材料占据机体 53% 重量。

图表19: 复合材料在波音和空客飞机上的应用



资料来源: 航空航天复合材料发展现状及前景, 华泰证券研究所

图表20: A350XWB 中复合材料的使用情况



资料来源: 复合材料在民用飞机中的应用趋势, 华泰证券研究所

国产民用飞机复材用量与波音、空客的先进飞机相比差距较大。国产主线客机 C919 先进复合材料在其机体结构用量达到 12%，其机翼构成以碳纤维复合材料为主，铝锂合金、钛合金为辅，后机身和平垂尾等使用了 T800 级碳纤维复合材料，襟翼和雷达罩使用了玻璃纤维复合材料，舱门和客货舱地板使用了芳纶蜂窝材料，航空发动机使用了碳纤维复材及陶瓷基复材，复合材料的使用使 C919 减重 7% 以上。

复材在航天装备上主要用于减重和防热

航天装备如导弹、火箭、高超声速飞行器等一般飞行速度较高，飞行过程表面温度高，对防热要求较高。导弹在大气飞行速度很高（接近或者远超过声速），此时由于导弹气动加热，其表面蒙皮及弹头温度会快速升高。根据驻点温度计算公式，假设导弹环境温度为 220K，我们初步计算了不同飞行速度下导弹蒙皮的温度，可以看出当导弹飞行速度达 4~10 马赫时，表面温度范围可达 445~3173℃，随着马赫数的提高，表面温度急剧上升，普通的铝合金甚至钛合金都难以满足要求，例如，美国改进型超音速海麻雀导弹在发射后 8~10 秒，弹体蒙皮温度可达 371℃，这种环境下 2024 铝合金强度会降低 90%，难以满足要求。因此，对于高速飞行的航天装备，需要采用各种不同类型的陶瓷材料及复材来实现防热，如美国 X-47B 高超声速飞行器使用了碳/陶瓷复合材料用来防热，耐高温可达 1700℃。

图表21: 导弹蒙皮温度计算公式

驻点温度计算公式:

$$T_s = T_a [1 + \beta (\frac{r-1}{2}) Ma^2] = T_a (1 + 0.164 Ma^2)$$

T_s : 导弹蒙皮驻点处温度

T_a : 导弹所处大气位置的周围环境温度

β : 边界层之间热传递恢复系数 (一般取值 0.82)

r : 大气绝热指数 (一般取值 1.4)

Ma : 导弹表面流体局部速度的马赫数

导弹蒙皮的平衡壁温约为驻点温度的 0.9 倍:

$$T = 0.9 T_s$$

资料来源: 基于 Fluent 的导弹蒙皮温度场数值计算及应用研究, 华泰证券研究所

图表22: 不同飞行速度下导弹表面温度 (假设导弹环境温度 220K)

马赫数	驻点温度 (K)	蒙皮温度 (°C)	马赫数	驻点温度 (K)	蒙皮温度 (°C)	假设环境温度 (K)
1	256	-42	6	1519	1095	220
2	364	56	7	1988	1517	220
3	545	218	8	2529	2004	220
4	797	445	9	3142	2556	220
5	1122	738	10	3828	3173	220

资料来源: 超音速导弹温度场建模与仿真, 华泰证券研究所

航天装备对重量要求也较严格，采用先进复材能够实现减重，对增大射程、提高精度意义显著。据《先进聚合物基结构复合材料在导弹和航天中的应用》文献，战略导弹弹头和上面级发动机质量每减少 1kg，可使洲际导弹射程增大 20km，20 世纪 60 年代初美国就采用玻璃钢取代超高强度钢成功缠绕制备了“北极星”潜地导弹发动机壳体，使得导弹射程增加了 27%。

战术及战略导弹

复材在战术弹上通常应用于弹体、弹翼、尾翼、雷达罩、进气道等位置。美国早期的“战斧”巡航导弹使用了较多的复合材料部件，如头锥、雷达罩、尾翼、进气道等，但性能一般，当时其它战术导弹大多仍以金属材料为主。20 世纪 80 年代以来，多种战术弹的固体发动机壳体和部分弹体蒙皮开始使用复合材料，例如，美国新一代空面巡航导弹 ACMI58-JASSM，在“战斧”巡航导弹的基础上为了大幅度地降低成本减轻弹体重量，不仅弹翼、尾翼、进气道采用复合材料，整个弹身全部舱段都采用了碳纤维复合材料，全弹减重了 30%，成本降低 50%。我国在亚音速岸舰、舰舰导弹天线罩上采用了复合材料，以环氧复合材料为蒙皮，聚氨酯泡沫为芯层。

20 世纪 60 年代复材就在美国的“北极星”战略导弹上取得了应用，此后美国的“民兵”、“海神”、“三叉戟-I”、“侏儒”、“三叉戟-II”、“MX”系列导弹；法国的 M-4、M-5 导弹；前苏联的 SS-24、SS-25 导弹均使用了复合材料。除了导弹本身，复材在发射筒上也有应用，能够实现大幅减重，如美国 MX 导弹的发射筒长 22.4 米，直径 2.5 米，使用高强钢时质量超过 100 吨，而使用碳纤维增强树脂基复材后仅 2 吨。我国战略导弹发射筒也采用了部分碳纤维复材筒段，比铝合金部件轻 28%。

我们认为，未来复材在导弹中的应用将会不断增长。随着先进增强材料和树脂基体的性能改进和成本不断降低，先进复合材料有可能越来越多地替代导弹传统的金属材料，从而大幅度地降低武器系统的重量，提高作战效能。

图表 23：复材在战略导弹及其发射装备上的应用示例

导弹构件	复材类型	国别	示例
固体发动机壳	玻璃钢	美国	“北极星”、“民兵”、“海神”
	芳纶材料	美国、法国、前苏联	“三叉戟-1”、“MX”、“M-4”、“SS-24”
	碳纤维	美国、法国	“侏儒”、“M-5”
仪器舱	环氧树脂/碳纤维	美国	“三叉戟-1”
支架、支座、托架等	石墨纤维	美国	“三叉戟-1”
发射筒	HBRF-55环氧树脂 / AS-4碳纤维	美国	“MX”

资料来源：先进聚合物基结构复合材料在导弹和航天中的应用，华泰证券研究所

运载火箭

运载火箭应用先进复合材料的主要部件是固体发动机（固体助推器和上面级发动机）壳体、箭体级间段、箭上卫星支架、有效载荷支架上以及可重复使用天地往返飞行器蒙皮等。近年我国已经在多种型号的运载火箭，特别是上面级结构中广泛采用复材，有效地减轻了上面级结构质量，对提高运载火箭发射有效载荷的能力具有十分明显的效果。例如，在“开拓者-1”小型运载火箭的第四级发动机采用了高性能碳纤维壳体；长征火箭（CZ-2C、CZ-2E、CZ-3A）的卫星接口支架和有效载荷支架（前后端框、环框、壳段、弹簧支架、井字形梁）采用了碳纤维增强环氧树脂基复材。

图表24： 复合材料在国外运载火箭上的应用

应用区域	复合材料类型	应用实例
固体发动机壳体	高性能碳纤维复材	美国“大力神-4”SRMU助推器、“德尔它-7925”的GEM助推器、“飞马座”火箭三级发动机
箭体级间段、箭上卫星支架、有效载荷支架	T650-35环氧树脂/R6376碳纤维	美国克莱门汀探月飞行器
	三角网格环氧树脂/碳纤维	日本H-2火箭连接有效载荷的级间段
	环氧树脂/碳纤维面板+泡沫芯共固化夹层	H-2A火箭级间段
	碳纤维复合材料面板	西班牙CASA公司“阿瑞安-4”和“阿瑞安-5”火箭仪器舱和有效载荷适配器
蒙皮	934环氧树脂/T300碳纤维复合材料	美国“大力神-4”适配器
	Hexply8552增韧环氧树脂/碳纤维	美国X-34和“德尔它快车”实验火箭DC-X/DC-XA复合材料蒙皮
超低温推进剂贮箱	850环氧树脂/TR-30碳纤维	日本实验轨道飞行器Hope-X全碳纤维复合材料面板
	8552环氧树脂/IM-7碳纤维	麦道公司复合材料液氢贮箱及无内胆复合材料液氢贮箱，应用于X-33和X-34飞行器
	RS-3氰酸酯/PF-XN35超高模碳纤维	日本富士重工天地往返系统液氢贮箱

资料来源：先进聚合物基结构复合材料在导弹和航天中的应用，华泰证券研究所

图表25： 复材在我国运载火箭上的应用

名称	结构要素	应用
卫星接口支架	碳纤维蒙皮、桁条、对接框、弹簧支架、开口加强的卫星支架	CZ-2E火箭
	碳纤维蒙皮、铝蜂窝芯子夹层结构卫星支架 (1700mm×1200mm×700mm)	CZ-3火箭
加筋壳	碳纤维蒙皮、桁条、环框、对接框、开口加强的加筋结构	火箭结构
梁	碳纤维“工”形截面整体成型火箭结构	火箭结构
	碳纤维“口”形截面整体成型仪器舱结构	仪器舱结构
“K”形梁	碳纤维工字型截面梁、构成组合梁，形成外圆直径3000m	仪器舱结构
环向加强框	碳纤维帽形加强框，各类直径均可实现	箭体加筋壳结构
碳纤维筒	质量约1000kg	
整流罩	碳纤维蒙皮、铝蜂窝芯子夹层结构，直径达到4.2m，长达11m	CZ-3火箭 CZ-2E火箭等
有效载荷支架	碳纤维蒙皮、铝蜂窝芯子夹层结构	CZ-2C火箭
“井”字架	4根变截面“工”字型梁整体成型而成，形成外圆φ2700mm	CZ-2C火箭

资料来源：碳纤维复合材料在航天领域的应用，华泰证券研究所

卫星

目前卫星的主要结构部件（太阳能电池阵、有效载荷、本体结构、桁架）都普遍采用了高性能复合材料。卫星使用复合材料对减轻质量的作用非常明显，一般说来，每减轻1kg卫星质量，就可使发射质量减轻100kg，因此卫星上应用复材较为广泛，尤其是高模碳纤维的应用较多。1993年发射的9颗Intelsat-7卫星中，先进复合材料已占其结构质量的50%。我国卫星从20世纪80年代中后期起，复合材料结构件用量迅速增加，使得卫星结构质量不断减轻。

图表26： 复合材料在卫星上的应用

应用区域	复合材料类型	应用实例
太阳能电池阵结构	碳纤维复合材料面板和边框蜂窝夹层结构	国际通信卫星-5、美国水星探测器“信使号”太阳能电池基板 (K13GIU/RS-3)
	环氧树脂/碳纤维	MBB公司的ULP板
	TD-86环氧树脂/M40碳纤维太阳能电池板基板	中国资源-1卫星；DFH-3卫星太阳能电池
有效载荷结构	环氧树脂/HMS碳纤维复合材料	法国电信-1卫星椭圆形抛物面天线反射器面板
	934环氧树脂/P75S碳纤维复合材料	欧洲通信卫星ASTP天线
	环氧树脂/碳纤维	美国“旅行者”探测器碟形天线
	环氧树脂/碳纤维	美国空军NATO-3卫星窄波喇叭天线
	环氧树脂/碳纤维	NASA“海盗号”探测器碟形天线
	环氧树脂/Kevlar碳纤维	“卡西尼”土星探测器四波段高增益天线反射器
	RS-3C氰酸酯/YSH-70A碳纤维	美国空军可展开式超大型天基光学望远镜
	氰酸酯/超高模碳纤维	欧空局远红外和亚毫米望远镜的全复合材料镜片
	RS-3C氰酸酯/M55J碳纤维	日本Solar-B卫星远紫外摄谱仪面板
本体结构 (包括卫星外壳、中心承力筒、仪表安装板)	环氧树脂/碳纤维	中国东方红通信卫星 (DFH-2、DFH-3)
	P-75超高模碳纤维面板	国际通信卫星-7承力筒
	碳纤维复合材料	德国OTS轨道试验卫星
桁架结构 (包括各种支撑机构、对接框架、内支撑架)	氰酸酯/碳纤维	美国海军GFO小型卫星
	934环氧树脂/P75碳纤维	“自由号”空间站管桁架
	P-75碳纤维	国际通信卫星-7
	碳纤维材料	中国东方红通信卫星 (DFH-2、DFH-3) 天线支撑结构 (上、下斜杠、水平杆)

资料来源：先进聚合物基结构复合材料在导弹和航天中的应用，华泰证券研究所

图表27： 复材在国内卫星上的应用

结构件名称	最大件尺寸/mm	产品结构要素
波纹承力筒	高：1983，锥段大端内径：1162	碳纤维波纹筒、对接框、环框、纵桁组成
夹层结构板	1668×158；1250×1985	碳纤维面板、铝蜂窝芯子
太阳能电池阵基板	1755×2581	碳纤维网络面板、铝蜂窝芯子
连接架	2581×750；2581×810	碳纤维方管、钛合金接头
支架	950×2030	碳纤维型材、铝合金接头
消旋支架	高：580，大端外径：887	8根碳纤维管 (长652)、铝合金接头
电池梁	“工”字型，750×54×44	碳纤维和钛合金混杂结构
喇叭天线	高约280，大端直径约250	CFRP本体，镀铜、金等
支撑筒	高约300，大端直径约140	CFRP、双锥两端法兰

资料来源：碳纤维复合材料在航天领域的应用，华泰证券研究所

复材在舰船领域的应用

复合材料质量轻、可设计性高、抗腐蚀性强，是未来追求更大有效负载、更强综合隐身能力、更低全寿命费用舰船装备的最佳材料选择之一。复合材料普遍质量轻、强度高，比强度高于船体钢和铝合金等传统造船结构材料，可有效提高舰船的稳定性和航速及运载能力；易于制成流线型及其它复杂形状；耐腐蚀性能优于传统金属材料；能通过增强内部构件在阻尼振动下的稳定性而减少噪音的产生；可减少雷达反射截面达到隐身效果；非磁性，不容易被鱼雷和水雷探测到；能很大程度上降低舰艇的热学特征；能根据需要改变基体和增强体来达到特定的目标。由于复合材料具有的这些特性，使复合材料成为理想的船用材料。

图表28: 瑞典维斯比级护卫舰舰体使用了复合材料



资料来源: 瑞典海军网, 华泰证券研究所

图表29: 美国 DDG1000 驱逐舰上层建筑使用了复合材料



资料来源: 美国海军官网, 华泰证券研究所

复合材料在舰艇中的应用起步较晚, 但用复合材料替代部分金属材料已经成为未来舰艇发展趋势, 复材在舰艇上的应用也从非承力结构件向次承力结构件和主承力结构件演变。复合材料在国外海军舰船上层建筑中的应用始于 20 世纪 60 年代中期, 最初用于制造巡逻炮艇上的炮艇甲板室。70 年代后, 猎雷艇的上层建筑也开始采用复合材料, 如芬兰皇家海军的快速巡逻艇“劳马”号。90 年代后, 复合材料开始应用于舰船的全封闭式桅杆/传感器系统。随着复合材料应用效果逐步得到各海军强国的认可, 复合材料在舰艇上的应用已经呈现出从非承力结构件向次承力结构件和主承力结构件演变、由个体试验性应用向全面推广应用的趋势。目前, 国外新型驱逐舰如美国 DDG 51 驱逐舰、DDG 1000 驱逐舰, 英国 45 型驱逐舰等都是先进树脂基复合材料应用的典型平台。一些舰艇用传统金属材料结构件正在被复合材料结构件替代, 包括中小型水面舰艇艇体; 大型水面舰船上层建筑、舱壁、螺旋桨、推进轴和舵; 水面舰艇内部设备和零件, 如热交换器、设备基座、阀、泵、管路、护栏; 潜艇的非耐压壳体、声纳导流罩、舵、水平翼、推进系统、基座、潜望镜、鱼雷发射管等等。

图表30: 复材在舰艇上的典型应用

复合材料部件	应用平台	材料	作用
上层建筑	美国DDG1000集成上层建筑	碳纤维增强+巴耳萨芯	雷达隐身、减重、防腐
	美国DDG51机库	玻璃纤维增强+巴耳萨芯	
	美国LPD-17综合桅杆	碳纤维增强+巴耳萨芯	
	法国“拉斐特”级护卫舰水面舱室	玻璃纤维增强(聚酯树脂)+巴耳萨芯材	
装甲	美国“黄蜂”级两栖舰	凯芙拉纤维/S玻璃纤维增强	防弹、减重、防腐
壳体	美国“短剑”号	碳纤维增强+巴耳萨芯	降噪、减重、磁隐身、防腐
	瑞典“维斯比”级轻护舰	碳纤维增强复合材料	
曲面舵	DDG51驱逐舰、DDG1000驱逐舰	HY80钢+E玻璃纤维增强复合材料+聚氨酯泡沫芯材	减重、减阻、防腐、降噪
声纳罩	“加里波第”号航空母舰	透声复合材料	透声、减重、防腐
其它(如管道系统、通风系统、舷侧通道、发动机关套、泵、雷达天线罩等)	各种水面舰艇	纤维增强复合材料 吸波材料等	防腐、降噪、减重、降低全寿命费用、隐身等。

资料来源: 复合材料在国外海军舰船上层建筑上的应用与发展, 华泰证券研究所

复合材料在国内外民用船舶领域也有较为广泛的应用。复合材料是中小型船艇, 特别是高速艇、高性能艇最合适的结构材料, 在国内外民船领域, 诸如游艇、渔船、救生艇、交通艇和高性能船艇等中获得了广泛的应用。

图表31: 复合材料在民用高性能快艇上也有应用

类型	型号或船名	总重或排水量/吨	载客或乘员	航速/节	研制国	完工年份
单体艇	AZIMUT 98	100	8	29	意大利	1996
	Rygerdoktoeren	-	12	44	挪威	2002
	Hai Shun	70	149	26	中国	2002
	WESTPORT 130	216	-	20	美国	2009
	MAGNUM 70	36	10	46	美国	2009
水翼艇	“渝飞”号	26	60	45.6	中国	1998
全垫升气垫船	PH11	-	-	40	荷兰	1991
船	Lynx	-	17	30	俄罗斯	1999
	ABS M-10	-	2	50	英国	-
侧壁式气垫船	“茶花”号	19.3	78	35	中国	1986
船	CIRR-120P	-	315	50	挪威	1988
	JETRIDER	-	250	39	瑞典	1988
双体气垫船	NES24	49	150	35	法国	1993
	“铁城”号	58	160	28	中国	1995
	“迎宾 6”号	90	225	30	中国	1995
双体船	RIVER RUNNER 150	-	130	20	荷兰	1999
	Sea Supreme	111	380	25	中国香港	2000
	27 m Ferry	-	180	32	挪威	2006
	“扬帆之星 1”号	208.9	298	18	中国	2011

资料来源: 复合材料及其在舰船中应用的最新进展, 华泰证券研究所

与国外相比, 目前我国船用复合材料应用范围和规模仍然较小。20世纪70年代中期我国曾研制过一艘总长近39米的扫雷试验艇。20世纪90年代以来, 随着技术发展与工艺引进, 我国采用复合材料生产了大量游艇、帆船、救助艇, 以及公安、武警、海监、海关等航速较高的巡逻艇、执法艇、缉私艇等准军事艇, 但迄今为止还未设计建造一艘高科技含量的复材军用舰艇。在复合材料船舶构件方面, 我国在20世纪60年代末成功研制了复合材料声纳导流罩, 并应用于潜艇, 发展至今已形成较为成熟的应用。20世纪80年代后期研制开发了复合材料雷达天线罩、水雷壳体并投入使用, 20世纪90年代成功研制了应用于大型水面船舶的复合材料桅杆等。

复材在陆军装备中的应用

复材在坦克与装甲车辆上的应用主要包括装甲及行动系统, 目的是降低重量和提高抗打击性能。复材在坦克装甲车辆上的应用始于20世纪70年代, 苏联T-64A是最早使用复材装甲的主战坦克, 现今由玻纤、凯芙拉、碳纤维等作为增强材料研制出的复材装甲与同等防护级别的金属材料装甲相比, 复材的使用可以使车体和炮塔结构的综合性能提高30%~50%, 重量减轻40%~45%。在行动系统, 如坦克履带、负重轮、托带轮、扭力轴等方面, 复材充分发挥了减重效果。如美军25t轻型坦克装甲战车采用的陶瓷增强铝基复材履带使坦克总重量减轻1吨; M113型坦克战车中使用的玻纤/环氧基复材的负重轮, 不仅比传统材料减重30%, 还能极大程度地减少地雷爆炸带来的损害。M60坦克中采用碳纤维/环氧树脂复材替代钢制扭力轴减重达65%以上。坦克发动机用活塞头、活塞连杆、调速齿轮、推进杆体等金属部件, 采用树脂基复材制造将比传统的金属构件减重30%以上。

图表32： 美国坦克和装甲车复合材料部件

型号	应用部件	材料	工艺	效果
M60 坦克	负重轮	ES-2 玻纤、环氧树脂	缠绕	<ul style="list-style-type: none"> 减重 26% / 轮 减少爆炸损害 
M60 坦克	纽带轮	玻纤、环氧树脂	模压	<ul style="list-style-type: none"> 减重 29% / 轮 提高机动性 
M113 装甲车	负重轮	S-2 玻纤、环氧树脂	缠绕	<ul style="list-style-type: none"> 减重 30% / 轮, 减少地雷爆炸损害 
Bracl ley战车	负重轮	玻纤、环氧树脂	缠绕	<ul style="list-style-type: none"> 减重 4.54kg / 轮 提高机动性 

资料来源：复合材料在地面机动武器装备上的应用，华泰证券研究所

复材在火炮上主要应用于炮管，目的是减重以提高机动性。国外已将高强度纤维树脂基复合材料制成火炮身管、炮管热护套、摇架、牵引杆和其他部件，可以大幅降低火炮重量从而提高其机动性能。以火炮炮管用复合材料为例，美国用石墨/环氧复合材料制备转膛炮的加长身管替代传统金属加长身管，在提高了火炮射击精度的同时，也实现了减重 37%。

图表33： 复合材料枪托



资料来源：树脂基复合材料在武器上的应用，华泰证券研究所

图表34： 复合材料弹匣



资料来源：树脂基复合材料在武器上的应用，华泰证券研究所

复材在轻武器上的应用较为广泛，主要目的也是为了减重。20 世纪七八十年代，树脂基复合材料逐步取代了传统金属材料，用于制备枪械的弹匣、套筒、发射机座、瞄准器、刺刀座、扳机、连发阻铁等部件口。如 20 世纪 70 年代苏联的 AR-24 突击步枪，就采用了玻纤增强酚醛复合材料制造弹匣，比金属弹匣轻 28.5%；美国 M60 型 7.62mm 通用机枪采用树脂基复合材料弹链，质量比金属弹链轻 30%。此后，为了进一步减轻重量，提高精度和耐久性，碳纤维/环氧基复合材料制造的复材枪管问世，如德国采用缠绕成型方法在陶瓷内管上缠绕金属丝增强环氧树脂成型机枪枪管。

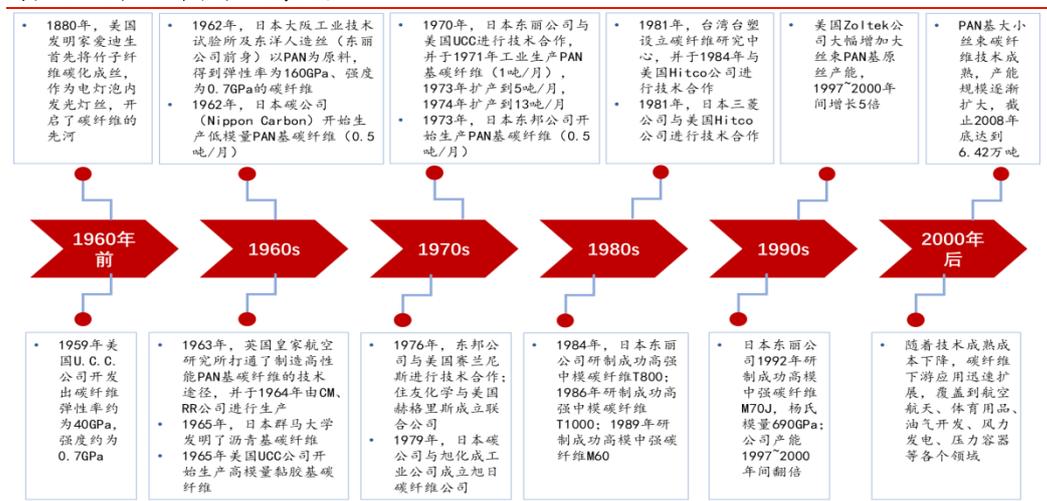
三、碳纤维：军用需求旺盛，未来增长潜力较大

“80岁以后本可以少管点事，但我心有不甘，仍想抓一抓碳纤维。如果中国碳纤维上不去，国防安全就无保证，我将死不瞑目”——师昌绪院士（2000年初）

按原材料不同分为三种，其中 PAN 基碳纤维占据主流

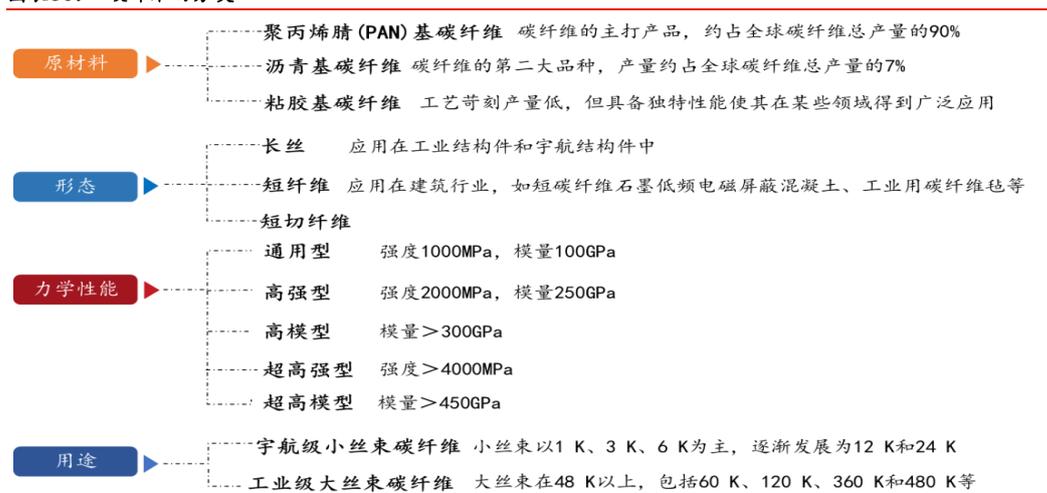
碳纤维性能优良，广泛应用于航空航天等国防领域。碳纤维是一种含碳量在 95% 以上的高强度、高模量纤维材料，是由片状石墨微晶沿纤维轴向方向堆砌而成，经碳化及石墨化处理而得到的微晶石墨材料。碳纤维复合材料以其轻质、高比强度、高比刚度、抗疲劳、耐腐蚀、便于大面积整体成形等优点，以及独特的可设计性，广泛应用于国防领域，为武器装备的轻量化、高性能化、长寿命等发挥了关键作用，其用量也已成为武器装备先进性的标志之一。

图表35：国际碳纤维行业发展历程



资料来源：光威复材招股说明书，华泰证券研究所

图表36：碳纤维的分类



资料来源：高性能碳纤维的性能及其应用，华泰证券研究所

碳纤维按原材料的不同主要分为**粘胶基、沥青基和聚丙烯腈基（PAN）碳纤维**三类，其中**PAN 基碳纤维占据主流**。由粘胶纤维制取高力学性能的碳纤维必须经高温拉伸石墨化，碳化效率低，技术难度大，设备复杂，成本较高，产量较低，产品主要为耐烧蚀材料及隔热材料所用；由沥青制取碳纤维，原料来源丰富，碳化收率高，但因原料调制复杂、产品性能较低，亦未得到大规模发展；由聚丙烯腈纤维原丝制得的高性能碳纤维，生产工艺相对简单，而且产品的力学性能优良，用途广泛，因而自 20 世纪 60 年代问世以来，取得了长足的发展，其产量约占全球碳纤维总量的 90% 以上，成为当今碳纤维工业生产的主流。

图表37： 三种碳纤维性能比较

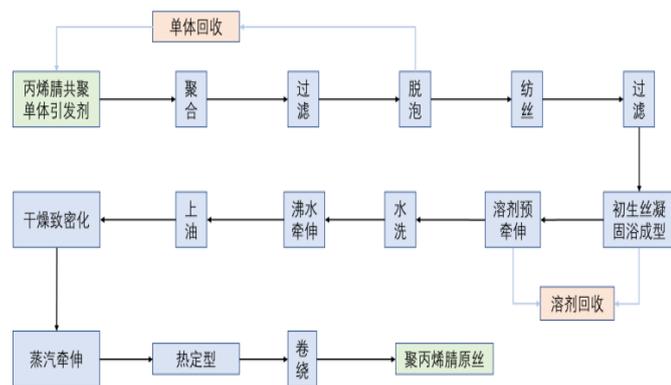
	抗拉强度 (MPa)	抗拉模量 (GPa)	密度 (g/cm)	断后延伸率 (%)
PAN基	• >3500	• >230	• 1.76-1.94	• 0.6-1.2
沥青基	• 1600	• 379	• 1.7	• 1
粘胶基	• 2100-2800	• 414-552	• 2	• 0.7

资料来源：PAN 基碳纤维组成结构高温演变规律及其对热氧化性能的影响，华泰证券研究所

PAN 基碳纤维

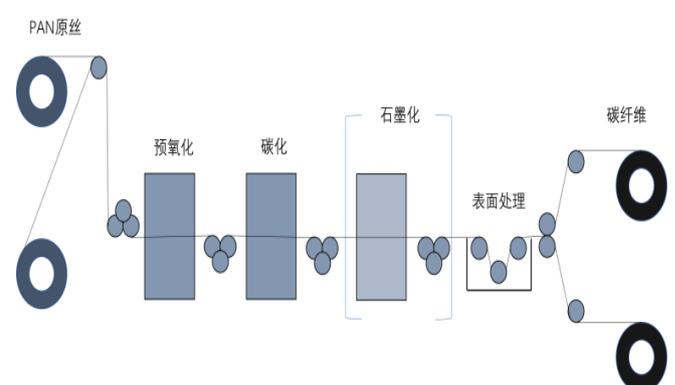
PAN 基碳纤维的制备过程主要包括 PAN 原丝制备、预氧化、碳化、后处理四个阶段。

图表38： PAN 原丝生产工艺流程



资料来源：碳纤维工艺技术研究及发展现状，华泰证券研究所

图表39： PAN 基碳纤维的制备过程



资料来源：PAN 基碳纤维组成结构高温演变规律，华泰证券研究所

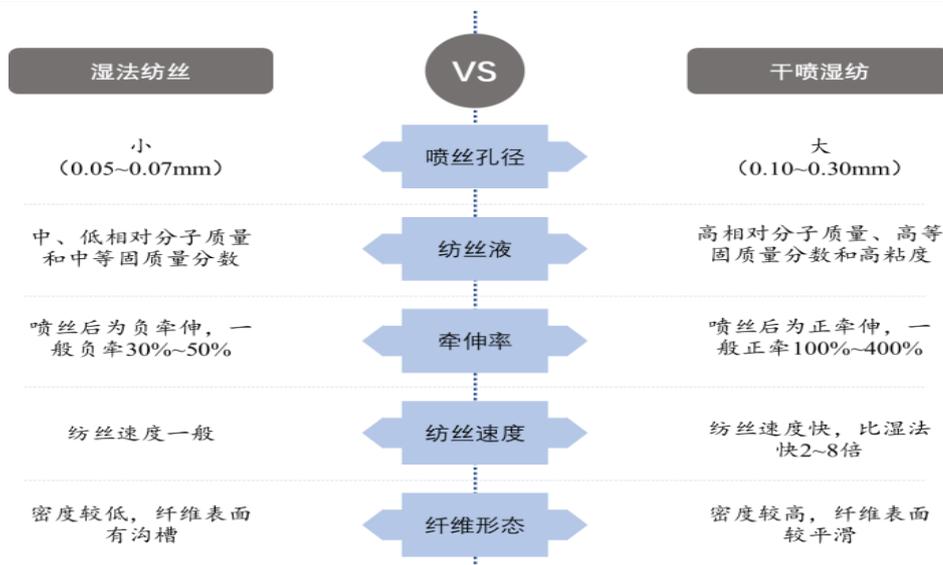
1. 原丝制备：PAN 原丝的制备是将聚丙烯腈单体聚合成纺丝原液，然后纺丝成型，原丝制备工艺是 PAN 基碳纤维的核心工艺，PAN 原丝的质量直接决定了最终碳纤维产品的质量、产量和生产成本。原丝纺丝工艺可分为湿法、干法、熔融法和干喷湿纺（干湿法）四种，其中湿法纺丝是目前应用最多的工艺，干湿法是目前最先进的纺丝工艺，能兼具干法与湿法纺丝优点，纺出的纤维体密度较高，表面平滑没有沟槽，可制得高性能碳纤维，且能够有效提高纤维的生产效率和降低制造成本。

图表40：不同纺丝工艺对比

 干法 纺丝	<p>技术特点：将成纤聚合物溶于挥发性溶剂中，通过喷丝孔喷出细流，在热空气中形成纤维</p> <p>工艺特征：生产的纤维中有少量溶剂残留，并且不容易洗净，在后续热处理过程中，溶剂的挥发或热分解会造成原丝的內部缺陷及纤维之间粘连，影响碳纤维产品的质量</p> <p>应用：在碳纤维生产中几乎不使用</p>
 湿法 纺丝	<p>技术特点：聚合物纺丝溶液经喷丝板上的喷丝孔挤出细流，直接进入凝固浴形成丝条</p> <p>工艺特征：此工艺所得纤维纤度变化小，凝固成型稳定，纤维的残留溶剂少，容易控制原丝质量；同时，制得的纤维表面具有沟槽结构特征，与树脂材料进行复合时，对树脂基体的普适性强，复合材料的界面性能较好</p> <p>应用：日本东丽的T300、T800H等型号产品采用湿法生产；日本三菱丽阳和帝人东邦、美国的赫氏、土耳其的Dow-Aksa、以及我国绝大多数碳纤维原丝生产厂家采用湿法纺丝工艺生产T300级碳纤维原丝</p>
 干喷 湿纺	<p>技术特点：聚合物纺丝溶液经喷丝板上的喷丝孔挤出细流，先经过空气层，后进入凝固浴形成丝条</p> <p>工艺特征：此工艺兼具干法纺丝与湿法纺丝的优点，能够实现高品质原丝的细纤度化和均质化，能够有效提高纤维的生产效率和降低制造成本</p> <p>应用：日本东丽的T700S、T800S、T1000等型号产品；三菱丽阳、赫氏、韩国晓星等也拥有干喷湿纺；国内中复神鹰、中油吉化、广州金发、常州中简等少数企业掌握了干喷湿纺T700级类碳纤维原丝的生产技术</p>
 熔融 纺丝	<p>技术特点：本体聚合物在螺杆挤出机中熔化后被送入纺丝部位，经纺丝泵定量送入纺丝组件，过滤后，由喷丝板的毛细孔中挤出。液态丝条通过冷却介质时逐渐固化，而后由下方的卷绕装置高速拉伸成丝</p> <p>工艺特征：纺丝仅使用少量溶剂作为增塑剂，可以降低溶剂回收量，减少工艺环节、降低生产成本；减少环境污染，生产工艺更“绿色”环保；容易实现纤维断面异形化，制备屏蔽等功能化碳纤维</p> <p>应用：德国BASF、美国BP/Amoco</p>

资料来源：PAN基碳纤维原丝纺丝技术及其发展现状、碳纤维工艺技术研究及发展现状，华泰证券研究所

图表41：湿法纺丝与干喷湿纺工艺对比



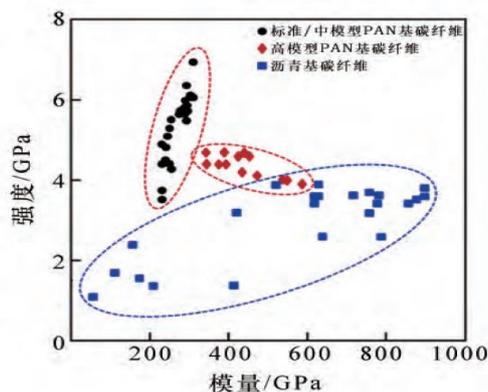
资料来源：高性能碳纤维原丝与干喷湿纺，华泰证券研究所

- 预氧化：**预氧化又被称为热稳定化，是碳纤维制备过程中耗时最长的工艺，一般为60~120min，预氧化反应一般在200~300℃温度范围内进行，预氧化过程中纤维结构的转变很大程度决定最终碳纤维的结构和性能，温度过低，预氧化反应缓慢或不充分，耗时太长，生产效率低；温度过高则易导致过度氧化、熔丝甚至燃丝。
- 碳化：**预氧化纤维在惰性气体保护下先经低温碳化炉，氮、氢、氧等非碳元素在炉内发生反应释放出来，碳化一般由低温碳化和高温碳化两个部分实现，低温区域温度一般在300至600℃，高温区域温度一般在600至1600℃，炭化工艺条件对最终碳纤维强度有直接影响。
- 后处理：**为得到较高模量的碳纤维，还需要对碳化后制得的碳纤维进行高温热处理，即碳纤维的石墨化。石墨化能够提高碳纤维的抗拉强度和抗拉模量。

沥青基碳纤维

沥青基碳纤维是航空航天工业不可缺少的工程材料。沥青基碳纤维的研究开发始于20世纪50年代末期，60年代初由日本群馬大学研制成功，60年代末在日本吴羽化工工业公司实现工业化生产。沥青基碳纤维虽然抗压强度及加工性能逊于PAN基碳纤维，但具有优良的传热性能、导电性能、高模量和极低的热膨胀系数，使其在军工及航天领域发挥着独特作用。沥青基碳纤维的制备一般包括原料调制、缩聚反应、纺丝和碳化等流程，合成碳纤维的关键步骤是前驱体的缩聚反应和碳纤维的高温碳化反应。

图表42：市售PAN基碳纤维和沥青基碳纤维强度和模量对应值



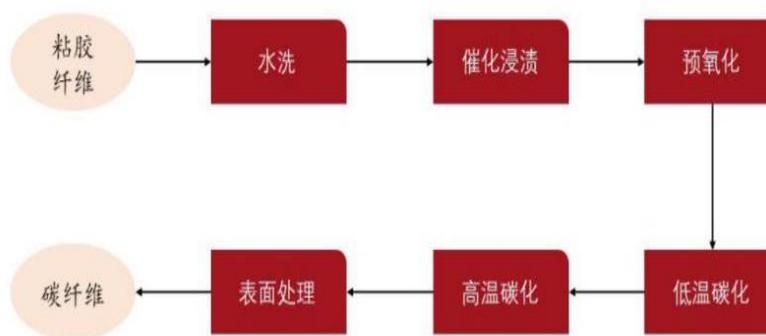
资料来源：国产高性能聚丙烯腈基碳纤维制备技术研究进展，华泰证券研究所

目前能规模生产沥青基碳纤维的公司主要是日美企业，通用级沥青基碳纤维供需均衡。通用级沥青基碳纤维的生产企业主要是日本吴羽化工工业公司，能批量生产高性能沥青基碳纤维的主要是日本三菱化学公司、日本石墨纤维公司和美国BP公司。我国沥青基碳纤维开发从20世纪70年代初期开始，上海焦化厂、中科院山西煤化所先后开展过研究，并取得一定研究成果。据《碳纤维复合材料》文献2017年1月报道，全世界沥青基碳纤维需求量约2000吨，产量约2000吨，国际市场基本均衡；国内通用级沥青基碳纤维产能约100吨，供需也基本平衡。

粘胶基碳纤维

粘胶基碳纤维生产成本低，且整体性能指标比PAN基碳纤维差，因此应用有限。粘胶基碳纤维是以粘胶纤维为原料，在低温热处理后，于非氧化气氛中进行800℃以上的高温热处理，最终制得以碳为主要成分的纤维材料。生产粘胶基碳纤维的工艺流程较长、工艺条件苛刻、炭化收率较低、不适合大批量生产、成本高，同时粘胶基碳纤维的整体性能指标比PAN基碳纤维要差，因此其应用受到了限制。

图表43： 粘胶基碳纤维生产流程



资料来源：粘胶基碳纤维的制造及其应用，华泰证券研究所

粘胶基碳纤维的独特性能使其在国防等领域得到应用,虽然产量低,但也难以完全被淘汰。粘胶基碳纤维的独特性能主要表现在:密度低,比一般 PAN 基和沥青基碳纤维密度小 15% 左右,所制复材更易实现轻量化;属于大伸长型碳纤维,韧性好易于深加工;由于是从天然纤维素转化而来,生物相容性好;碱和碱土金属含量低,抗氧化和热稳定性好,耐烧蚀。虽然粘胶基碳纤维加工工艺苛刻、产量低,但这些独特性能使其适合应用于防热隔热保温场景以及医用生物材料等,因此粘胶基碳纤维难以完全被淘汰。例如,美国和俄罗斯均利用粘胶基碳纤维作为复材的增强材料,用于洲际战略导弹弹头的大面积防热材料。目前俄罗斯在粘胶基碳纤维开发研究及应用上整体居于世界之首,美国联合碳化公司和希特柯公司在粘胶基碳纤维生产方面也具有一定实力。

PAN 基碳纤维按力学性能不同分为三类,在国防领域应用各有侧重

按力学性能不同,可将碳纤维分为高强型碳纤维、高模型碳纤维以及高强高模型碳纤维。以东丽公司的产品为例,其主要生产三大系列碳纤维,即高强 T 系列、高模 M 系列、以及兼备高强高模的 MJ 系列,其中高强型包括 T300、T600、T700、T800 和 T1000;高模型碳纤维主要有 M30、M40 和 M46,市场流通的高模碳纤维主要是 M40;高强高模型的碳纤维主要有 M46J、M50J、M55J、M60J 和 M65J 等。

图表44: 日本东丽公司不同类型碳纤维性能对比

纤维牌号	每束纤维根数	抗拉强度 /MPa	抗拉模量 /GPa	伸长量 /%	线密度 / (g/km)	密度 / (g/cm ³)
T300/T300B	1000/3000 /6000/12000	3530	230	1.5	66/198/396/800	1.76
T400HB	3000/6000	4410	250	1.8	198/396	1.80
T700SC	12000/24000	4900	230	2.1	800/1650	1.80
T800SC	24000	5880	294	2.0	1030	1.80
T800HB	6000/12000	5490	294	1.9	223/445	1.81
T830HB	6000	5340	294	1.8	223	1.81
T1000GB	12000	6347	294	2.2	485	1.8
T1100GC	12000/24000	6600	324	2.0	495/990	1.79
M35JB	6000/12000	4510/4700	343	1.3/1.4	225/450	1.75
M40JB	6000/12000	4400	377	1.2	225/450	1.77
M46JB	6000/12000	4200/4020	436	1/0.9	223/445	1.84
M50JB	6000	4120	475	0.9	216	1.88
M55J/M55JB	6000	4020	540	0.8	218	1.91
M60JB	3000/6000	3820	588	0.7	103/206	1.93
M30SC	18000	5490	294	1.9	760	1.73

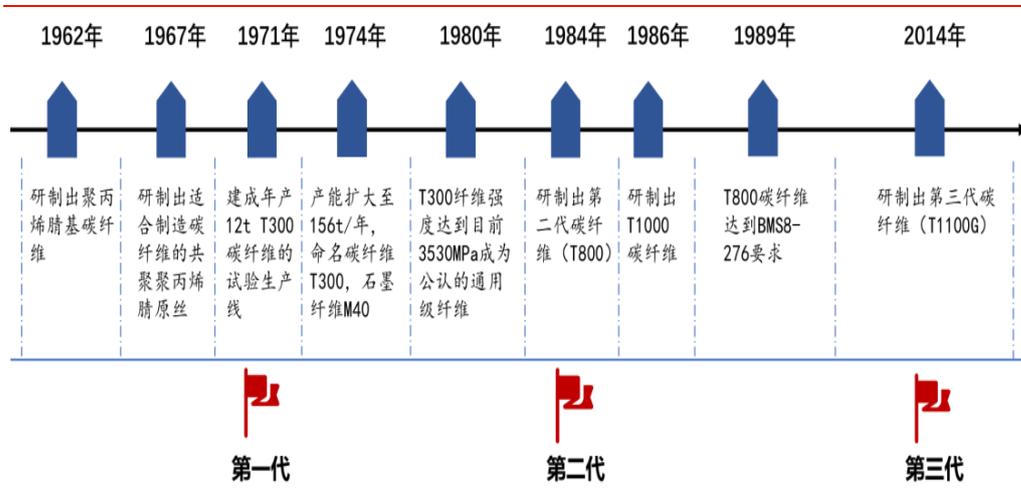
资料来源:东丽公司官网,华泰证券研究所

不同类型碳纤维在国防领域均有应用,但应用重点不同,高强型主要用于航空领域,高模型主要用于航天领域。第一代碳纤维为标准模量碳纤维,以东丽公司的 T300 和赫氏公司的 AS4 碳纤维为代表,主要用于航空次承力构件,如 T300 主要用于波音 737 等型号的次承力构件,AS4 应用在早期 F-14 战斗机的平尾等部位。第二代高强碳纤维以东丽公司的 T700、T800、T000 和赫氏公司 IM7、IM8、IM9 系列为代表,主要用于航空主承力构件,如 T800 大量用于 A350、波音 787 等飞机机翼机身的主承力结构,IM7 大量用于美国的“三叉戟”II 潜射导弹及 F-22、F-35 战斗机等。然而二代高强碳纤维由于模量偏低,且碳纤维材料脆性大,易导致复合材料结构部件的疲劳损伤,限制了武器装备性能的提升,因此美日等国都在研究第三代高强碳纤维,其中东丽目前已研制出第三代碳纤维 T1100G 碳纤维,正进入产业化阶段。在航天领域,卫星结构设计在满足强度的条件下主要解决刚度问题,要求碳纤维具备一定强度的同时还具备高模量或超高模量,因此高模型碳纤维主要用于航天领域。高强高模型碳纤维能在保持高模量下,兼有高的拉伸强度、压缩强度和断裂伸长率,在航空和航天领域都能作为主承力结构件应用。

日美 PAN 基碳纤维技术及产业化处于领先地位

日本东丽公司是全球碳纤维产业执牛耳者。1961年日本大阪工业研究所近藤昭男博士用美国杜邦公司的奥伦为原料成功研发出 PAN 基碳纤维。1967年日本东丽公司研制出适合制造碳纤维的共聚聚丙烯腈原丝，此后于 1971 年建成年产 12 吨的第一代碳纤维试验生产线，此后扩产并命名为 T300。1984 年东丽研制成功 T800H 碳纤维（第二代碳纤维），其强度较 T300 碳纤维提高了近 56%，模量较 T300 碳纤维提高了近 28%。1986 年，成功研制 T1000G 碳纤维，其模量与 T800H 碳纤维相同，其强度较 T800H 碳纤维提升了 16%。2014 年 3 月，东丽成功研发出兼具高强度高模量的 T1100G 碳纤维（第三代碳纤维），其强度较 T800H 碳纤维提升了 20%，模量提升了 10%，2017 年 6 月强度又由 6600MPa 更新至 7000MPa，目前正在进行产业化。东丽公司高强型碳纤维实现了以 T300、T800 和 T1100G 为代表的三代碳纤维的跨代发展。在高模碳纤维方面，东丽公司也开发出多种高模纤维及高强高模纤维。

图表45：日本东丽公司碳纤维发展历史关键事件



资料来源：高性能聚丙烯腈基碳纤维发展现状与分析，华泰证券研究所

东丽此前以生产高性能的小丝束碳纤维为主，通过并购 ZOLTEK 公司，进军低成本的大丝束碳纤维细分产业。2015 年东丽收购了美国 ZOLTEK（卓尔泰克）公司，ZOLTEK 是世界上首先研制生产廉价且高性能大丝束碳纤维的公司。大丝束碳纤维价格比小丝束碳纤维要低，如飞机结构件常用的 3K 碳纤维国际售价约 50 美元/kg，而 ZOLTEK 的 48K 大丝束碳纤维售价仅 12-15 美元/kg。2018 年，ZOLTEK 公司宣布将扩大其位于匈牙利及墨西哥的产能，分别由 1 万吨/年增加到 1.5 万吨/年，由 5000 吨/年增加到 1 万吨/年，一旦完成扩产计划，ZOLTEK 公司的大丝束碳纤维总产能将提升至 2.5 万吨/年。

除了日本东丽公司外，东邦人造丝和三菱人造丝等公司业发展自己的技术，进行了碳纤维的工业化生产。目前日本拥有完备的人造丝基、PAN 基、沥青基和中间相沥青碳纤维产业，占据着各细分技术的制高点，掌控着高端产品市场。

美国 PAN 基碳纤维产业化落后于日本，但仍具有较强实力。美国拥有可保障军用的技术、产品和产能，但产品性价比优势不如东丽，HEXEL（赫克塞尔）公司是美国最大的碳纤维研制生产企业，产品在军机中取得大量应用。HEXEL 公司生产的碳纤维共有三个系列九个牌号，分别是：AS 系列的 AS4C、AS4 和 AS4D；IM 系列的 IM4、IM6、IM7、IM8 和 IM9 以及 UHM 系列的高模 UHM 石墨纤维。其中 AS 系列碳纤维的抗拉强度在 3860~4207MPa，比日本东丽公司的 T300 的抗拉强度高，与 T300J 或 T600S 相近；IM 系列碳纤维的抗拉强度在 4138~6343MPa，与东丽公司的 T600S、T700S、T800H 和 T1000G 相当。HEXEL 公司生产的碳纤维已经大量应用于 A400M 运输机、RAH-66 “科曼奇” 直升机、F-22 战斗机、F-35C 战斗机以及洲际导弹，其中 F-22 战斗机采用了 IM7 纤维应用于机翼、机身等主承力构件，复材用量占比达到 24.2%。

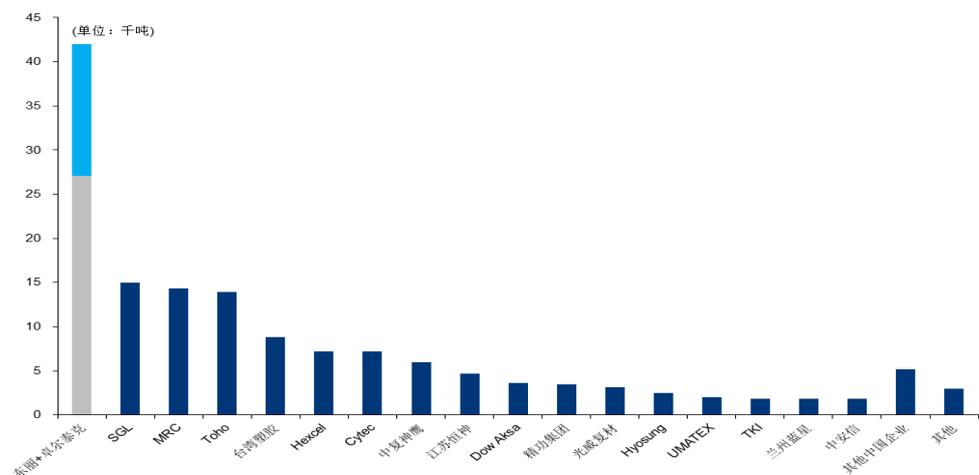
图表46：美国 HEXEL 公司碳纤维牌号与性能

牌号	每束纤维数 /K	抗拉强度 /MPa	抗拉模量 /GPa	延伸率 /%	线密度 / (g/cm)	密度 / (g/cm ³)
AS4C	3, 6, 12	3860	226	1.6	0.2, 0.4, 0.8	1.77
AS4	3, 6, 12	3930	221	1.6	0.221, 0.425, 0.857	1.79
AS4D	12	4207	241	1.7	0.76	1.78
IM4	12	4138	276	1.5	0.735	1.73
IM6	12	5240	276	1.7	0.448	1.76
IM7	6, 12	5379	276	1.8	0.223, 0.446	1.77
IM8	12	5447	303	1.7	0.448	1.80
IM9	12	6343	290	2.0	0.331	1.79
UHM	3, 6, 12	3447	441	0.8	0.086, 0.171, 0.341	1.87

资料来源：碳纤维复合材料，华泰证券研究所

碳纤维市场行业集中度高，日本三家企业产能占全球总产能近一半。据《2017 全球碳纤维复合材料市场报告》统计，2017 年，全球碳纤维理论产能为 14.71 万吨，其中日本三家企业产能合计 7.02 万吨，占比 47.72%，具备绝对的领先优势。中国大陆 2017 年理论产能为 2.6 万吨。

图表47：2017 年全球主要碳纤维企业理论产能情况



资料来源：2017 全球碳纤维复合材料市场报告，华泰证券研究所

图表48：2017 年全球主要碳纤维市场需求细分

应用	航空 航天	体育 休闲	风电 叶片	汽车	混配模 成型	压力 容器	建筑	碳碳 复材	电子 电气	船舶	电缆芯	其他	总量
需求 (千吨)	19.2	13.2	19.8	9.8	6.9	5.6	3.2	2.1	1.2	0.9	0.9	1.4	84.2
数量份额 (%)	22.8	15.7	23.5	11.6	8.2	6.7	3.8	2.5	1.4	1.1	1.1	1.7	100
价格 (美元/kg)	60.0	23.0	14.0	18.0	18.0	20.0	20.0	18.0	23.0	23.0	23.0	20.0	-
需求 (百万美元)	1152.0	303.6	277.2	176.4	124.2	112.0	64.0	37.8	27.6	20.7	20.7	28.0	2344.2
百分比 (%)	44.6	14.1	12.9	8.2	5.8	5.2	3.0	1.8	1.3	1.0	1.0	1.3	100

资料来源：2017 全球碳纤维复合材料市场报告，华泰证券研究所

我国 PAN 基碳纤维研发起步不晚，但目前与国外存在较大差距

我国碳纤维研发起步不晚，但徘徊较久。国产 PAN 基碳纤维技术研发始于 20 世纪 60 年代，但由于工艺基础薄弱、装备技术落后等原因，制备的碳纤维质量低下、性能稳定性差，国产化技术长期徘徊在低水平状态，这一阶段的国产碳纤维不能作为结构复合材料的增强体使用，主要用于制备功能复合材料。1996 年开始，北京化工大学实现了有机溶剂体系制备具有圆形截面高强碳纤维原丝技术的突破，中国石油吉林石化公司以此为基础开始了工程化技术研究，国产 PAN 基碳纤维制备技术成功实施转型。

在“一条龙”项目牵引下，国产碳纤维技术发展迅速，威海拓展率先实现高强型碳纤维产业化，高强中模、高强高模碳纤维也先后研发成功。2002 年，在以师昌绪先生为代表的材料界前辈强有力推进下，863 计划设立碳纤维技术研究专项，自然科学基金也支持开展碳纤维相关基础研究。2005 年国家推行碳纤维制备与应用的“一条龙”管理模式，在航天 703 所和航空工业 601 所的牵引下，国产碳纤维制备与应用技术高效快速发展，解决了国防重大装备用国产碳纤维材料的“有无”问题，初步实现了关键材料的自主保障。2006 年威海拓展开始建设中国首条千吨级碳纤维生产线，2009 年建成投产，此后相继开发出多种型号碳纤维。目前国内已经能够规模化生产 T300 级、T700 级、T800 级碳纤维，具备国产替代能力，并已经研制成功 T1000、T1100 级高强中模碳纤维和 M55J、M60J 高强高模碳纤维。

图表 49： 国产 T300/T700/T800 级碳纤维以及具备替代进口能力

量级	性能	国外	光威复材	恒神股份	中复神鹰	中简科技	精功科技
T300 级	拉伸强度 (MPa)	3530	3530	≥3530	4000/5000	-	3500~4000
	拉伸模量 (GPa)	230	230	221~242	230	-	250~280
	伸长率 (%)	1.50	1.50	1.50~1.95	1.90	-	1.3~1.7
	体密度 (g/cm ³)	1.76	1.76	1.78	1.79	-	1.80±0.02
T700 级	拉伸强度 (MPa)	4900	4900	≥4900	4900	≥4900	5000~5400
	拉伸模量 (GPa)	230	240/250	245~270	230/250	235~265	250~280
	伸长率 (%)	2.10	2.04/1.95	1.70~2.20	2.10/1.95	1.80~2.10	1.3~2.0
	体密度 (g/cm ³)	1.80	1.79	1.80	1.79	1.78±0.02	1.80±0.02
T800 级	拉伸强度 (MPa)	5880/5490	5800/5500	≥5880/≥5490	5900/5500	≥5800	≥5500
	拉伸模量 (GPa)	294	295	284~304	295	330±10	290±10
	伸长率 (%)	2.00/1.90	1.97/1.90	1.70~2.10	2.00/1.90	≥1.70	≥1.90
	体密度 (g/cm ³)	1.80/1.81	1.79	1.81	1.79	1.80±0.02	1.78±0.02

资料来源：楚江新材公告，华泰证券研究所

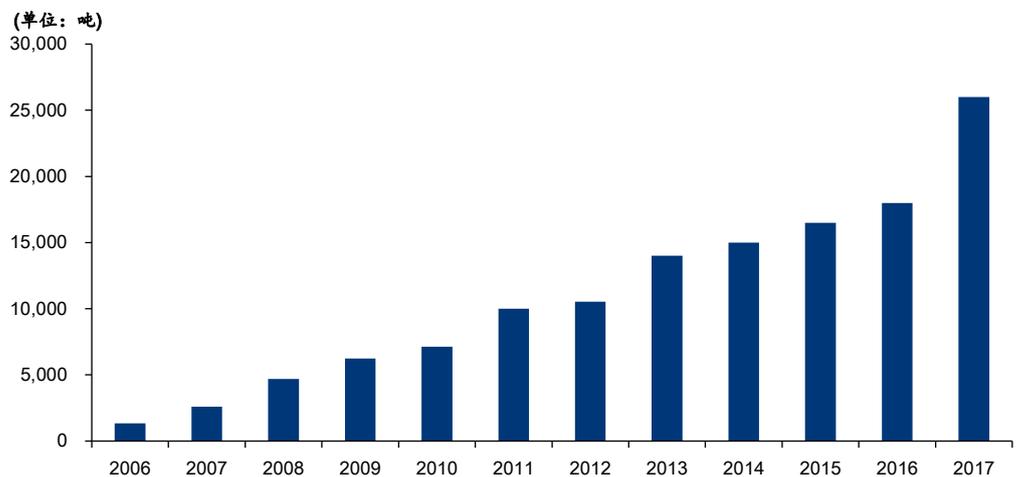
2017 年国内碳纤维理论总产能达 2.6 万吨/年，但销量/产能较低，高端应用较少。中国现有 20 余家 PAN 基碳纤维生产企业和 6 家碳纤维研究单位，已建成的碳纤维产能达 2.6 万吨/年，在建的生产线建成后将达到 10 万吨/年以上。据赛奥碳纤维统计，2017 年国内碳纤维企业销量大约 7400 吨，销量/产能仅 28%，显著低于全球平均的 57.2%，且产品在高端领域应用偏少，导致国内碳纤维企业盈利能力较差。

图表50: 我国 PAN 碳纤维生产厂家及研究单位分布图



资料来源: 国产聚丙烯腈碳纤维发展现状与建议, 华泰证券研究所

图表51: 2006-2017 年我国 PAN 碳纤维理论产能 (吨)



资料来源: 国产聚丙烯腈碳纤维发展现状与建议, 华泰证券研究所

光威复材及中简科技的碳纤维产品已在军工领域取得应用。据楚江新材公告, 光威复材规模化生产的 GQ3522 型 (T300 级) 碳纤维, 性能指标与日本东丽相当, 已在军工航空航天领域稳定供货; 中简科技公司规模化生产的 ZT7 系列 (高于 T700 级) 碳纤维, 性能指标高于日本东丽的 T700 级碳纤维和 T300 级碳纤维, 2014 年全面应用于航空航天领域, 进入批量稳定生产阶段, ZT7 系列国产高性能碳纤维首次真正应用在我国自主研发的航空航天装备上, 打破了国外对高性能碳纤维的封锁和限制。

图表52：国内典型碳纤维企业情况介绍



- 主要产品：GQ35223522 (T300级)、GQ45224522 (T700级)、QZ5526 (T800级)、QM4035 (M40J级)
- T300级碳纤维已在军工航空航天领域稳定供货

产能情况：碳纤维全产业链，产品T300级碳纤维176吨/年（2016年数据）；T700级碳纤维1100吨/年



- 主要产品：ZT7系列（高于T700级）、ZT8系列（T800级）、ZT9系列（T1000/T1100级）和高模型ZM40J（M40J级）
- 国内航空航天领域ZT7系列（高于T700级）碳纤维产品的批量稳定供应商

产能情况：具备年产千吨T700/T800级碳纤维的能力。



- 主要产品：T300、T700、T800、M30级碳纤维生产和销售企业

产能情况：碳纤维产能达6000吨/年，是目前国内产能最大的企业

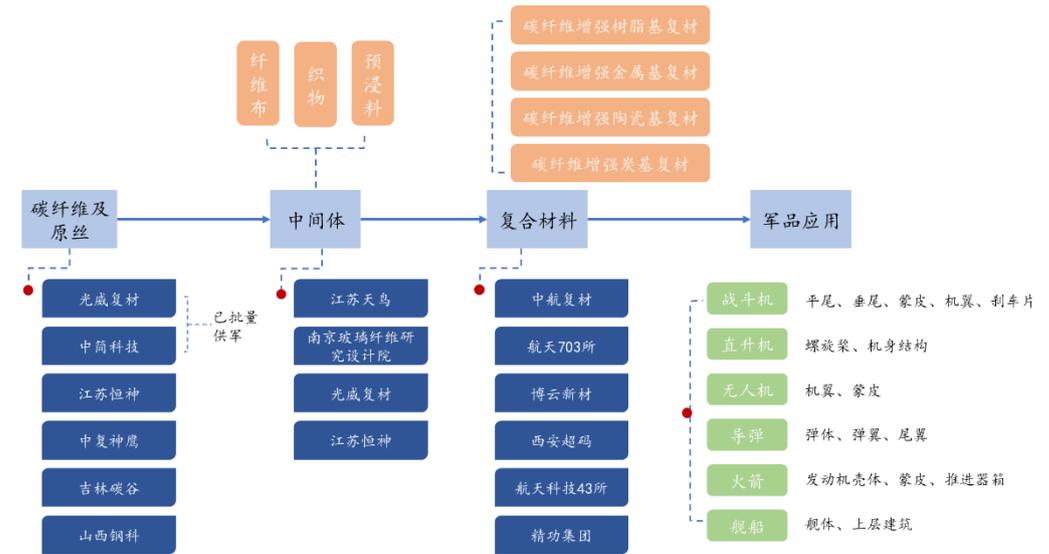


- 主要产品：HF10、HF30、HF40等系列碳纤维

产能情况：恒神股份碳纤维项目全部是千吨级碳纤维生产线，具备年产4500吨的碳纤维生产能力

资料来源：楚江新材公告，华泰证券研究所

图表53： 我国军用碳纤维产业链



资料来源：2017 全球碳纤维复合材料市场报告，华泰证券研究所

碳纤维增强复合材料在国防领域应用广泛

碳纤维增强树脂基复合材料应用较广，已用于承力结构件

碳纤维增强树脂基复合材料是指以有机合成树脂为基体，高性能碳纤维为填充物复合而成的复合材料，具备轻质高强、耐高温、耐腐蚀、热力学性能优良等特点，能够满足航空航天结构件的使用要求，在卫星、火箭、军用飞机、民用飞机上均获得了较为广泛的应用。

图表54： 碳纤维复合材料在国外部分战斗机上的应用

型号	首飞时间	铝合金	钛合金	铜	复合材料	其他
F-14A	1970	39%	24%	17%	1%	19%
F-15A	1972	36%	27%	6%	2%	29%
F-16A	1976	64%	3%	3%	2%	28%
幻影2000	1978		23%		7%	
F/A-18C/D	1978	49%	13%	17%	10%	11%
F/A-18E/F	1995	31%	21%		19%	15%
AV8B	1982	44%	9%		26%	
阵风	1986			5%	24%	
JAS-39	1988				30%	
F22	1997	11%	41%		24%	

备注：表中复合材料主要是指碳纤维增强树脂基复合材料

资料来源：碳纤维复合材料，华泰证券研究所

航空领域，国外多种机型上都有应用，且应用的比例越来越高，国内也在多个机型上取得应用。目前军用飞机上使用的碳纤维主要是 T300 级和 T700 级小丝束碳纤维，碳纤维增强树脂基复合材料的应用可降低飞机重量，有助于提升飞机机动性于作战半径，在战斗机、轰炸机、直升机和无人机上的应用越来越多，如 F-16 战斗机在进气道斜板、平尾和垂尾等结构采用了碳纤维/环氧树脂复合材料，蒙皮采用了碳纤维/双马来酰胺复合材料。此外，虽然普通碳纤维不具备吸波功能，但异形截面碳纤维和异形结构的复合材料具备吸波能力，再配合吸波涂层可以用来制造隐身结构材料，如美国 B-2 隐身轰炸机及 F-22 隐身战斗机均使用了碳纤维增强树脂基复材。据 2017 年发表的《碳纤维复合材料》著作：随着国内先进树脂基复合材料性能的提高，制造技术的不断成熟，国内的碳纤维增强树脂基复合材料也在直升机、歼击机和大型飞机上取得了应用。

在航天领域，碳纤维增强树脂基复材在导弹发动机壳体、导弹弹体、火箭发动机壳体、卫星天线及本体结构等位置取得了应用。高强中模碳纤维复合材料已经广泛应用于洲际导弹一、二、三级发动机壳体和新一代中程地地战略导弹发动机壳体，如美国的“侏儒”小型对地洲际导弹的三级发动机燃烧室壳体、发动机壳体已经采用碳纤维环氧树脂制成，美国陆军研制的小型动能导弹也开始应用碳纤维/环氧树脂复合材料。据《碳纤维复合材料》著作报道：我国在各类战略和战术导弹上也大量采用碳纤维复合材料作为发动机喷管和整流罩等防热材料。

图表55：碳纤维增强树脂基复合材料在国外航天领域的应用

	型号	国家	碳纤维增强树脂基复材	应用位置
	侏儒	美国	IM-7碳纤维/HBRF-55A环氧树脂复材	三级发动机燃烧室壳体
	三叉戟D5	美国	碳纤维/环氧树脂复材	二级固体发动机壳体
导弹	爱国者PAC-30	美国	T800碳纤维/环氧树脂复材	发动机壳体
	CKEM	美国	T1000碳纤维/环氧树脂复材	壳体
	圆锤	俄罗斯	粘胶基碳纤维增强酚醛复材	发动机喷管及大面积防热层
火箭	阿里安4	欧洲	碳纤维增强环氧树脂基复材	发动机壳体
卫星	JER-1	日本	M40JB碳纤维/环氧蜂窝夹层结构复材	本体结构（推力筒、仪器支架、支撑杆、分隔环外壳、仪器安装板）
	ERS-1	欧洲	碳纤维/环氧树脂复材	大型可展开式天线

资料来源：碳纤维复合材料，华泰证券研究所

碳纤维增强炭基复材主要用于飞机刹车盘及航天耐烧蚀材料

炭/炭复合材料是碳纤维增强炭基体复合材料，具备密度低、比模量和比强度高、高温性能好、热膨胀系数低、耐高温、耐热冲击、耐腐蚀、摩擦磨损性能好等一系列优异性能，已广泛应用于航空、航天、核能、化工、机械等各个领域，其中航空制动应用最多。

在航空领域，主要作为制动材料应用于飞机刹车盘，替代传统的粉末冶金刹车盘。早期的飞机刹车片使用的是合金盘，炭/炭复合材料使用寿命比粉末合金盘高 3~4 倍，而密度仅为合金的 1/3，高温下摩擦系数和力学性能稳定，维修方便，在国外军民飞机上已经广泛使用，目前已有 40 种以上的民用飞机和 20 多种军用飞机使用了炭刹车盘，如民航中的波音 747/757/767/777/787、空客 A300/310/318/319/320/340，以及军机中的美国 F 系列战斗机、幻影战斗机等都使用了炭/炭复合制动材料刹车装置。

在航天领域，主要作为耐烧蚀材料应用于火箭发动机喷管及喉衬等位置。炭/炭复合材料已经在航天领域的应用主要是作为耐烧蚀材料，已成功应用于制造航天飞机的机翼前缘、鼻锥、货舱门、固体火箭发动机尾喷管和喉衬等构件。如美国在 Deltalll 运载火箭 RL10B-2 的上级发动机上成功地应用了炭/炭复合材料部件；美国 MX 洲际导弹的全部三级，三叉戟导弹的一、二级，美国侦察兵导弹第三级等均采用了炭/炭复合材料作为发动机喉衬。据 2017 年发表的《碳纤维复合材料》著作报道：我国已将炭/炭复合材料喉衬应用于固体火箭发动机。

图表56： 炭/炭复合材料的应用

应用领域	炭/炭复材优势性能	应用实例
炭/炭刹车盘	减重、耐高温 良好的摩擦性	空客A300-600、A330、A340； 波音747-400、757、767
火箭发动机喉衬	耐高温抗烧蚀	美国MX洲际导弹的三级；三叉戟导弹的一、二级等
航空发动机	密度低、耐高温	美国LTV公司制造出的涡轮叶和涡轮盘整体部件； HIT-CO公司的鱼鳞片； 通用电气公司JID验证机的涡轮叶片和涡轮盘整体部件； 俄罗斯制造发动机涡轮盘零件、隔热瓦片、喇叭型管、导向叶片
机械制造	密度低、耐高温	真空炉发热体、发动机活塞和活塞环及其他高性能密封材料

资料来源：炭/炭复合材料研究应用现状及思考，华泰证券研究所

图表57： 炭/炭复合材料产品示例



资料来源：博云新材公司官网，华泰证券研究所

碳纤维增强其他基体复材种类较多，部分在国防领域取得了应用

碳纤维还可以与其他多种基体进行复合，如陶瓷基体、金属基体、橡胶基体等等，种类较多，其中部分材料在国防领域取得了应用。

碳纤维增强陶瓷基复合材料具有优异的高温力学性能和热性能，在惰性环境中超过 2000℃ 仍具能保持强度、模量等力学性能不降低，比炭炭复合材料具有更好的抗氧化性、抗烧蚀性，覆盖的使用温度和寿命范围宽，在航空发动机、燃气轮机、高速刹车盘和空间飞行器中取得了应用。例如，C/SiC 复材目前已在美国 NASA 的 X-38 空天飞行器上作为鼻锥及其附件使用，并已试飞成功；欧洲阿里安-4 第三级液氢/液氧推力室喷管采用了 C/SiC；法国将 C/SiC 复材应用于狂风战斗机 M88 发动机的喷嘴瓣和外襟翼。

碳纤维增强金属基复合材料通常选择铝、镁、镍、钛及其合金作为基体材料，材料性能取决于所选组分的特性、含量及分布等，通常具有高比强度、高比模量、良好的导电及导热性能、热膨胀系数小、尺寸稳定性好、耐磨性好、良好的断裂韧性和抗疲劳性能等，在国防领域也取得了应用。例如，碳纤维增强铝基复材在 NASA 空间望远镜中作为大型天线支杆。

碳纤维军用需求旺盛，未来增长潜力大

军机处于批产上量拐点，新一代军机复材占比提升明显，对碳纤维需求量有望大幅增长。根据 World AirForce 2018 的数据，美国拥有军机总数达 13407 架，其中战斗机为三代+四代的组合；而中国拥有军机总数为 3036 架，为美国的 23% 左右，其中战斗机为二代机+三代机+极少量四代机的组合。和美国相比，中国的军机水平在质量和数量上均存在较大的差距，面临较为迫切的更新换代的需求。而且我国新一代军机的复材用量提升明显，四代机复材用量占结构件重量比例达 20%，三代机仅 10%，我们认为，新机型的批产将会带动碳纤维需求的大幅提升。

陆海空天导弹需求大，航天领域对碳纤维需求有望持续上升。火箭军是我国战略威慑的核心力量和大国地位的战略支撑，是维护国家安全的重要基石，其装备建设历来备受关注。抗战胜利阅兵和建军九十周年阅兵中，火箭军装备均作为压轴方阵出场，密集的装备展示也凸显了我国火箭军装备技术成熟，开始大规模进入现役。火箭军按照“以作战的方式训练、以训练的方式作战”的要求，近年来常态开展部队战备拉动和作战流程检验演练，先后组织 40 余次重大演训任务，并与战区、其他军种联手，展开突击攻防、联合行动 30 多场次，发射导弹数百发。目前，所有导弹旅组织过红蓝对抗演练、具备独立发射能力，担负战备值班任务部队全时保持高度戒备状态，发射单元弹在架上、随时待发。2018 年 4 月 26 日下午，在国防部例行记者会上，国防部新闻局局长、国防部新闻发言人吴谦大校宣称，解放军的火箭军部队已经列装东风-26 型导弹。该型导弹经过试装试用和作战检验，具备了整建制装备部队的条件，授装后已正式进入火箭军战斗序列。我们认为，高强度的训练消耗和新装备批量列装部队，军用航天防务装备进入产业上升期，有望提升对军用碳纤维的需求。

舰船装备复材应用比例较低，未来复材比例提升有望增加对碳纤维的需求。国外舰船应用复材量较高，例如美国在大型驱逐舰（DDG1000）上层建筑上大量采用了复合材料，大幅降低了舰艇的雷达反射截面积，提升了舰艇隐身能力。而我国目前舰艇应用复材量仍较低，上层建筑主要是金属件，未来随着复材技术的发展，以及装备设计能力的加强，有望在新型舰艇上提升复材应用比例，进而增加对碳纤维及其复材的需求。

四、碳化硅纤维：打破封锁实现量产，有望开启下游广阔空间

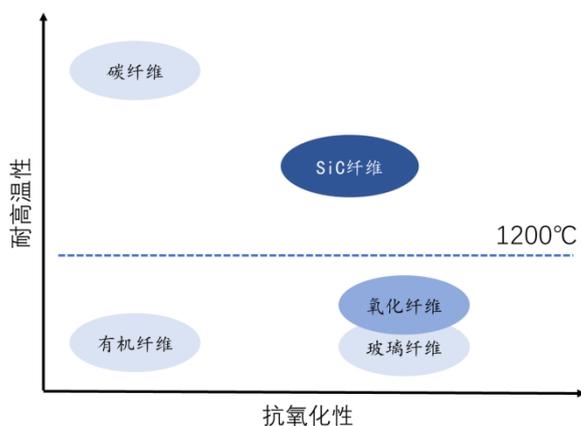
“航空发动机的工作环境是长时强氧化环境，纤维必须抗氧化。目前国际上用的是高性能碳化硅纤维，国内没有该产品，国际对中国严密封锁。这类战略性物资，各国都独立发展，中国也要自主研发。我相信中国近期会有自己的碳化硅纤维”——张立同院士（2008年）

碳化硅纤维按耐温性能可分为三代

航空航天和尖端武器的发展对高温结构材料提出了新的要求。新型航空航天器与尖端武器热端部件，要求材料具有优异的比强度、比模量、抗冲击性以及极端环境下的耐高温能力。金属及合金材料已难以满足新的要求，先进陶瓷基复合材料（CMC）具有高强轻质、抗冲刷、抗腐蚀、耐高温等优异性能，能够满足新装备的使用要求。CMC 要求增强纤维具有耐高温、抗氧化、抗蠕变和耐腐蚀等特点。

碳化硅纤维是高性能复材理想的增强纤维材料。常见的复合材料增强纤维包括有机纤维、玻璃纤维、碳纤维、氧化物陶瓷纤维及以碳化硅为代表的非氧化物陶瓷纤维。有机纤维因耐热温度不超过 500℃ 而不能用于高性能 CMC，普通玻璃纤维因熔点或软化点低于 700℃ 而同样无法在高性能 CMC 中应用；碳纤维虽然在惰性气氛下耐温性能可高达 2800℃，但在氧化气氛下高于 450℃ 时会发生严重降级，抗氧化性能差极大地限制了其在氧化环境中的应用；氧化铝、氧化锆以及玄武岩等氧化物陶瓷纤维的耐热温度均不超过 1200℃，同时其密度大、热膨胀系数高等不足均限制了其应用；SiC 纤维作为目前发展最成熟且已实现商品化的非氧化物陶瓷纤维，具有耐高温、抗氧化、较高的抗拉强度、良好的抗蠕变等优异性能，并且与陶瓷基体相容性良好，同时 SiC 纤维集结构、防热、吸波等功能于一身，是一种理想的高性能复合材料增强纤维。

图表58：常见复合材料增强纤维及其耐温性能



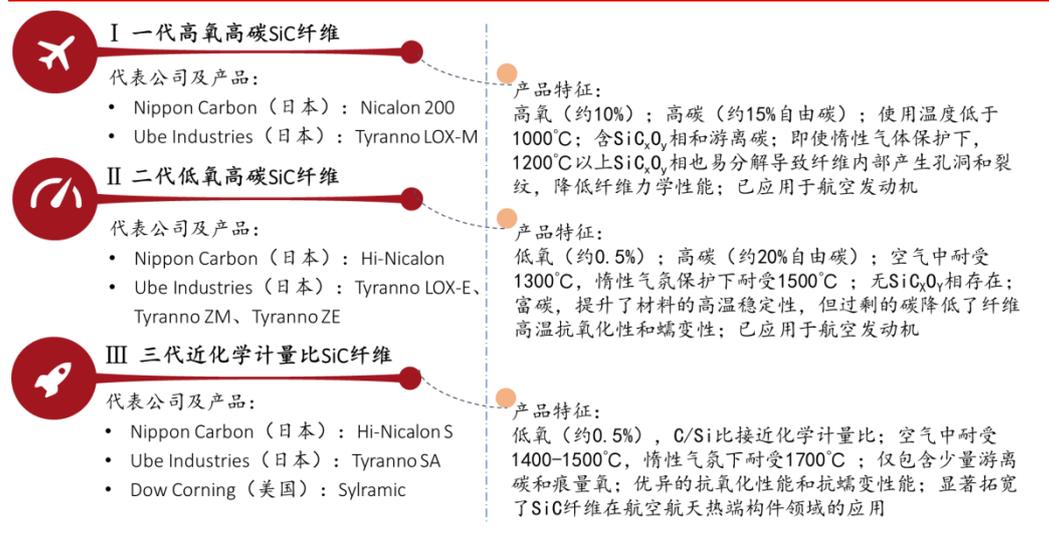
资料来源：KD 系列连续碳化硅纤维组成、结构与性能关系研究，华泰证券研究所

SiC 纤维及其制品性能优异，属于关键战略材料，国外长期对国内实行严密的技术封锁。碳化硅（SiC）纤维是以有机硅化合物为原料经纺丝、热解而制得具有 β-碳化硅结构的无机纤维，从形态上分为晶须和连续碳化硅纤维两种，碳化硅纤维具有优异的力学性能、抗氧化性能、高温稳定性、电性能可调性以及与金属和陶瓷基体之间良好的物理化学相容性，在航空、航天、兵器、船舶和核工业等领域具有广泛的应用前景，是发展高技术武器装备的关键战略材料之一。由于 SiC 纤维重要的战略意义以及军事敏感性，美日等国均从战略高度投入巨资研究与开发耐高温 SiC 纤维及其复合材料，SiC 纤维历来也是国外对我国的禁运产品。

SiC 纤维发展至今已三代，其中第三代碳化硅纤维耐温性能最好。按照 SiC 纤维的热稳定性可将其分为三代，一代碳化硅纤维为高氧高碳 SiC 纤维，氧含量 10% 以上（氧是由于原丝采用氧化交联而引进的），自由碳含量 15% 以上，在 1000℃ 以上纤维内部会发生化

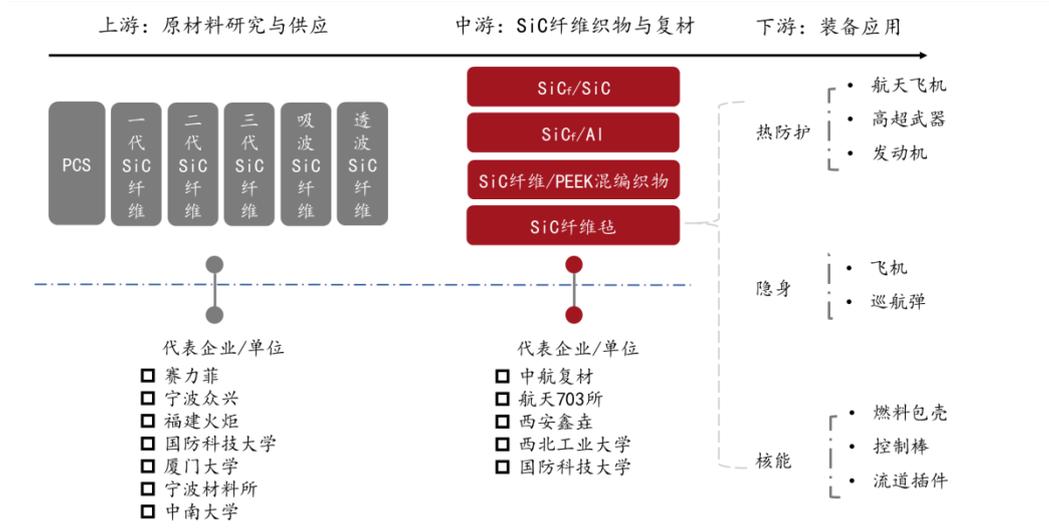
学反应，生成 SiO_2 和气相 CO ，会导致纤维产生孔洞损伤，力学性能严重降低，因此在有氧环境下其使用温度一般不高于 1000°C ；二代为低氧（约 0.5%）、高碳（约 20% 自由碳）含量 SiC 纤维，由于原丝采用无氧电子束交联，氧含量显著降低，该纤维使用温度提高到 1200°C 以上，但是过剩的碳降低了纤维的高温抗氧化性和蠕变性；三代为近化学计量比 SiC 纤维，只有少量游离碳和痕量氧，氧含量约为 0.2%，C/Si 比约为 1.05-1.08，少量碳过剩是为了保证纤维不富硅，避免严重影响其高温性能，三代碳化硅纤维具有优异的抗氧化性能和抗蠕变性能，使用温度可达 1600°C ，显著拓宽了其在航空航天热端构件领域的应用。

图表59：碳化硅纤维发展至今已发展出3代



资料来源：连续碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料研究进展，华泰证券研究所

图表60：SiC纤维及其制品产业链



资料来源：新一代发动机高温材料-陶瓷基复合材料的制备，华泰证券研究所

先驱体转化法是目前工业化制备 SiC 纤维的主要方法

先驱体转化法是目前比较成熟且已实现工业化生产的方法，是国内外工业化制备 SiC 纤维的主要方法。碳化硅纤维的制备方法主要有先驱体转化法、化学气相沉积法（CVD）、微粉烧结法（PS）、活性碳纤维碳热还原法（CR，又称化学气相反应法）等。其中 CVD 法制备的 SiC 纤维纯度高、强度高、模量高，但制备成本高、生产效率低，难以实现大规模生产，且直径偏粗编织困难，不利于复杂复材构件的制备；PS 法制备的 SiC 纤维高温抗蠕变性能好，但纤维强度较低且直径偏粗，美国 Carborundum 公司曾尝试用此法生产，

但目前已停产；CR法工艺简单、成本较低，但纤维的强度和模量均不高，可编织性差，不利于工业化应用；先驱体转化法制得的陶瓷纤维具有良好的力学性能与细直径，适于工业化批量生产，相应降低了制造成本（成本约为CVD法的1/10），且性能的改进与提高潜力大，成为制备高性能纤维较为理想的方法，因此目前日本碳公司（NipponCarbon）、宇部兴产公司（UbeIndustries）、美国DowCorning公司、德国Bayer公司等均采用先驱体转化法作为制造工艺路线，但不同公司采用的技术细节仍有差异。

图表61：制备SiC纤维的常用方法

- 1 先驱体转化法**

 - ✓ 力学性能良好、直径细、适于工业化批量生产，制造成本低（约为CVD法的1/10），性能的改进与提高潜力大
 - ✓ 制备高性能纤维较为理想的方法
 - ✓ 采用该方法公司：日本碳公司（Nippon Carbon）、宇部兴产公司（Ube Industries）、美国DowCorning公司、德国Bayer公司
- 2 化学气相沉积法**

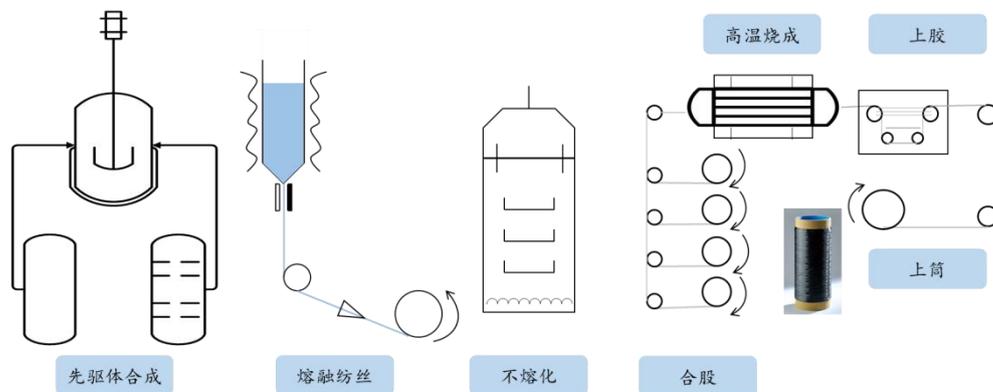
 - ✓ 纯度高、强度高、模量高，
 - ✓ 制备成本高、生产效率低，难以实现大规模生产，且直径偏粗编织困难，不利于复杂器材构件的制备
- 3 微粉烧结法**

 - ✓ 高温抗蠕变性能好
 - ✓ 强度较低且直径偏粗
- 4 活性碳纤维碳热还原法**

 - ✓ 工艺简单、成本较低，
 - ✓ 强度和模量均不高，可编织性差，不利于工业化应用

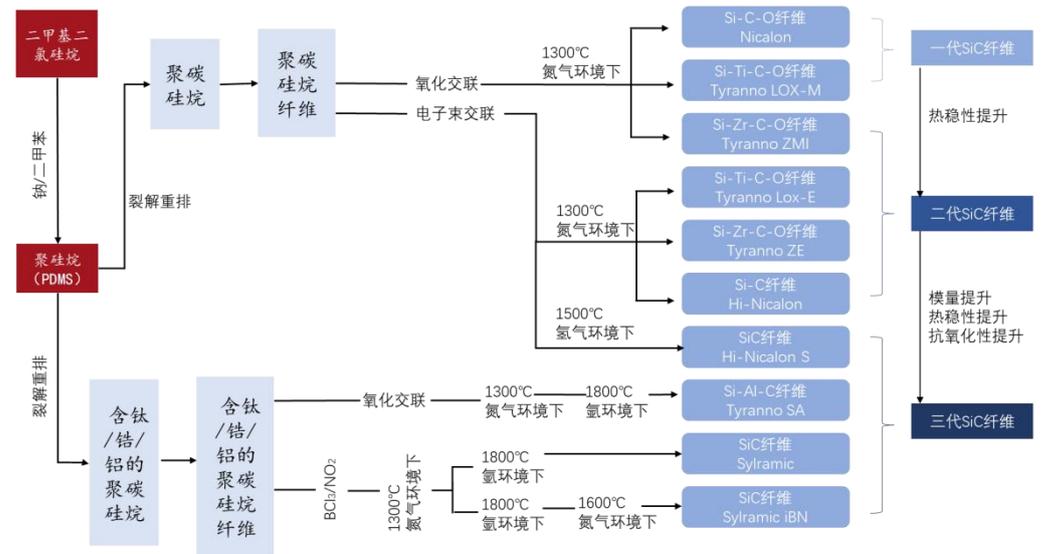
资料来源：先驱体转化法制备SiC纤维的研究进展，华泰证券研究所

图表62：先驱体转化法工艺流程



资料来源：高温吸波结构材料体系组成以及制备方法，华泰证券研究所

图表63： 先驱体转化法中不同技术方向能制备不同类型的碳化硅纤维



资料来源：先驱体转化法制备 SiC 纤维的研究进展，华泰证券研究所

图表64： 用电子束和氧化法生产碳化硅纤维的比较

工艺方法	纤维直径 (μm)	每束纤维	化学组分 (质量%)		
			Si	C	O
电子束交联	14	500	62.7	32.1	0.5
氧化交联	15	500	58	31	11

资料来源：碳化硅纤维及其复合材料，华泰证券研究所

原丝不溶化处理及高温烧成是较为重要的工艺环节，对纤维性能影响较大。先驱体转化法通常包括先驱体的合成、先驱体的熔融纺丝、将原丝进行不溶化处理（是为了防止纤维在热解过程中发生熔融），以及不溶化纤维的高温烧成（不溶化纤维在真空或惰性气体中加热至 1200~1500°C，侧链的甲基与氢同时脱出后只留下硅-碳的骨架，形成β-碳化硅结构的纤维）等四大工序，其中聚碳硅烷（PCS）原丝的不溶化处理及高温烧成是较为重要的两个工艺环节。早期的工艺采用氧化法对 PCS 原丝进行不溶化处理，但得到的是含氧量较高的一代 SiC 纤维，高温下拉伸强度下降明显。此后采用电子束辐射交联技术进行不溶化处理后，得到了低氧的二代 SiC 纤维，高温性能较好。

随着技术进步，SiC 纤维的性能和制备成本都在不断提升。第一代 SiC 纤维的典型代表为通用级的 NicalonNL202，在 1000°C 时仍然有良好的热稳定性；第二代典型代表为 Hi-Nicalon，在 1300°C 以下时具有较好的热稳定性；第三代典型代表为 Hi-NicalonS 和 Tyranno 系列，在 1300°C 以上也具有较好得热稳定性。总体来看，SiC 纤维从第一代发展到第三代，其制备温度和热稳定性最高温度都在向着更高方向发展，纤维氧含量降低，密度升高，直径降低，纤维生产成本大大增加。先驱体转化法制备工艺中有不同的技术方向，不同技术路线的成本差异较大，但总体来看三代 SiC 纤维成本明显高于一代和二代。

图表65: 国外企业研制生产的三代 SiC 纤维

	商标	公司	交联方法	最高耐温(°C)	元素组成(wt%)	晶粒大小(nm)	拉伸强度(GPa)	模量(GPa)	平均直径(μm)	成本(\$/kg)
一代 SiC 纤维	Nicalon 200/201	日本碳	氧化交联	1200	56.5Si+31.2C+12.3O	2	3.0	220	14	1292
	Tyranno LOX-M	宇部兴产	氧化交联	1200	55.4Si+32.4C+10.2O+2Ti	3-5	3.3	187	11	1550
	Tyranno S	宇部兴产	氧化交联	1200	50.4Si+29.7C+17.9O+2Ti	3-5	3.3	170	8.5/11	1292
二代 SiC 纤维	Hi-Nicalon	日本碳	电子束交联	1300	63.7Si+35.8C+0.5O	5-10	2.8	270	14	4198
	Tyranno ZMI	宇部兴产	氧化交联	1300	56.1Si+34.2C+8.7O		3.4	200	11	1808
	Tyranno SA1/SA3	宇部兴产	氧化交联	>1700	67.8Si+31.3C++0.3O+0.6Al	200	2.8	380	10/7.5	8396
三代 SiC 纤维	Sylramic	美国COI Ceramics	氧化交联	>1700	95.7SiC+0.3O+3.0TiB ₂ +1.0B ₄ C	100	2.7	310	10	10979
	Sylramic iBN	美国COI Ceramics	氧化交联	>1700	SiC/BN	>100	3.0	400	10	13563
	Hi-Nicalon Type-S	日本碳	电子束交联	>1500	68.9Si+30.9C+0.2O	100	2.6	420	12	9042

资料来源:美国陆军研究实验室,华泰证券研究所

备注:价格数据为2012年5月数据

日本率先开展研究,我国与美德同期起步,但进展同比落后

日本最先开展 SiC 纤维的科研及生产。1975 年和 1976 年,日本东北大学矢岛教授先后发表文章提出了聚碳硅烷 (PCS) 的合成方法,以及由 PCS 经热分解转化制备 SiC 纤维的结果,随后日本碳公司与宇部兴产公司先后购买了矢岛教授关于 SiC 纤维和含钛 SiC 纤维制造的专利。1982 年日本碳公司生产了第一批工业化的碳化硅纤维 Nicalon100 系列,随后又推出了 Nicalon200 系列纤维,成为了一代 SiC 纤维的典型代表;1987 年宇部兴产公司以聚钛碳硅烷 (PTCS) 为先驱体,采用空气交联技术制备出了含钛 SiC 纤维并实现了产业化,命名为“TyrannoLox-M”。此后,两家公司不断改进原材料、工艺流程及参数,相继实现了一代、二代及三代 SiC 纤维的产业化。

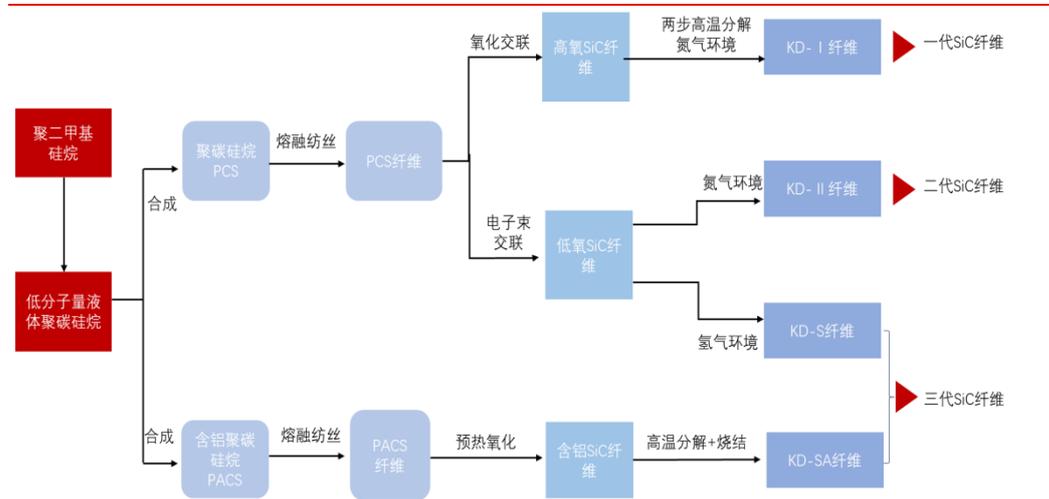
美德等国在日本的工艺基础上进行了改进和创新,也实现了产业化。面对日本企业在 SiC 纤维开发上获得成功,美国和德国也不甘落后,除了应用日本的 SiC 纤维开展了大量 SiC 纤维复材制备技术研发之外,也开始研发 SiC 纤维的制备技术,并进行了工艺创新。例如,美国 DowCorning 公司以 PCS 为先驱体,在 SiC 纤维制备过程中引入硼,再在 1800°C 高温下烧结制得含硼的多晶 SiC 纤维,纤维的强度和模量高,耐热性能好,并已制得连续纤维,工业化产品命名为“Sylramic”;德国 BayerAG 公司则另辟蹊径,基于无定型纤维的思路,在 1990 年代和成了新型的聚硼氮烷 (PBSN) 先驱体,并经热分解转化制得了在 2000°C 仍能维持无定型态的 SiBN₃C 纤维,其力学性能及耐热性俱佳,并已制得连续纤维,工业化产品命名为“Siboramic”。

图表66： 国外先驱体转化法制备碳化硅发展历程

时间	研究发展进程
1975	矢岛教授利用先驱体转化法成功研制出SiC纤维
1976.04	日本碳公司建立月产1Kg碳纤维工厂
1978.12	日本碳公司产能达到25Kg/月
1980	矢岛教授成功研制出含钛SiC纤维 (Si-Ti-C)
1981.02	日本碳公司建立月产100Kg的试验工厂
1984	宇部兴产公司根据矢岛教授专利生产含钛SiC纤维 (Si-Ti-C)
1984.12	日本碳公司建立能月产1吨SiC纤维的工厂，产品商标Nicalon
1988	宇部兴产公司含钛SiC纤维 (Si-Ti-C) 产能达到月产1~2吨，商标Tyranno
1992	日本碳公司扩大产能至4~5吨/月
1995	日本碳公司可以每月生产1吨Hi-Nicalon (二代SiC纤维)
1986~1988	美国Dow corning公司研制出多晶SiC纤维，以“Sylramic”商品名销售
1996~1998	宇部兴产公司生产出Tyranno-LoxM\LoxE\ZM\SA系列高性能碳化硅纤维
1998~1999	Hi-Nicalon开始进入国际市场
1996~1999	德国Bayer公司研制并生产出Si-B-N-C纤维“Siboramic” (三代SiC纤维)
1999年至今	SiC生产企业开始提高产能，并研制新品种高耐热性的SiC纤维

资料来源：PCS 和 PMCS 的新合成方法及高耐热性 SiC 纤维的制备研究，华泰证券研究所

图表67： 国防科大研发的三代 SiC 纤维



资料来源：KD 系列连续碳化硅纤维组成、结构与性能关系研究，华泰证券研究所

国防科大是国内最早开展先驱体转化法制备 SiC 纤维、含钛 SiC 纤维的单位，技术实力较强。早在 1980 年国防科大就开展了 SiC 纤维制备技术研究，近 40 年来，对 SiC 纤维的制备路线、关键原料的合成、制备工艺技术以及生产线建设等开展了一系列研究并取得了重大进展，目前主要开发了 KD-I 型第一代 SiC 纤维（综合性能接近日本 Nicalon 纤维水平）、KD-II 型第二代 SiC 纤维、KD-S 型与 KD-SA 型第三代 SiC 纤维，同时针对不同功能需求成功研制了吸波 SiC 纤维和透波纤维。KD-SA 是含铝 SiC 纤维，KD-SA 纤维在空气中具有更加优良的高温抗氧化性能，1300℃热处理 100 小时后强度保留率为 55%，远超过 Hi-Nicalon (23%)。

厦门大学特种先进材料实验室在西工大张立同院士的指导下，于 2002 年开始低氧高碳型连续 SiC 纤维的制备研发，2004 年该实验室突破纤维制备关键技术，定长纤维的性能接近日本同类产品水平，此后开始连续 SiC 纤维的产业化研究。

中科院宁波材料所及中南大学目前也突破了第三代 SiC 纤维制备技术。据中科院官网介绍，中科院宁波材料技术与工程研究所特种纤维事业部 SiC 纤维研究团队从 2015 年初开始承担研制第三代碳化硅纤维的任务，目前已自主研发了纺丝设备，在连续碳化硅纤维研制方面取得重要进展，打通了从先驱体制备、熔融纺丝、不融化到烧成整条技术路线，下一步将进一步改进工艺，实现高性能连续碳化硅纤维的制备。据中南大学官网介绍，中南大学航空航天大学于 2016 年与湖南博翔新材料有限公司合作建设高性能碳化硅纤维及其复合

材料湖南省工程实验室，目前实验室已成功制备出第三代掺杂碳化硅纤维，制备出的连续碳化硅纤维使用温度达 1250°C（空气气氛下）。

图表68：国内先驱体转换法制备碳化硅发展历程

时间	研究发展进程
1980	国防科技大学开始研制先驱体转换法碳化硅（SiC）纤维
1981-1983	国防科技大学成功研制出SiC短纤维以及相关研制设备
1986-1990	国防科技大学成功研制出长度约100米的连续SiC纤维
1991-1995	国防科技大学建立月产10Kg的生产线，研制出半导体级的含钛SiC纤维
1996-2000	国防科技大学成功建立年产500Kg的试验厂，研制出含硼（B）SiC纤维，通过预热氧化交联和电子束交联方法得到不成熟的聚碳硅烷纤维
2001-2004	国防科技大学建立新型陶瓷纤维与复合材料重点实验室，开始向客户供应连续SiC纤维，研制出异型SiC纤维和含铝、锆、铁SiC纤维
2004	国防科技大学优化生产过程，提高了产出和SiC纤维性能
2004	厦门大学完成年产500Kg的SiC纤维的试验厂研制工作
2005	国防科技大学与苏州赛菲合作生产SiC纤维
2016	苏州赛菲实现连续碳化硅纤维产业化
2017	宁波众兴建成年产10吨第二代连续碳化硅特种陶瓷生产线

资料来源：PCS 和 PMCS 的新合成方法及高耐温性 SiC 纤维的制备研究，华泰证券研究所

日本企业是全球 SiC 纤维主要生产厂，国内工业化生产处于起步阶段

国外三代 SiC 纤维均已实现产业化，日本 NipponCarbon 公司和 UbelIndustries 公司是国际市场最主要的 SiC 纤维生产厂家，总产量占到全球的 80%左右。国外第一代、第二代和第三代 SiC 纤维均实现了工业化生产，其中 NipponCarbon 公司的纯 SiC 纤维（牌号 Nicalon）和 UbelIndustries 公司的含钛、含锆、含铝等类型的 SiC 纤维（牌号 Tyranno）产量均达到 100 吨级，且基本保持稳定。美国 DowCorning 公司研制成功含硼的 SiC 纤维，牌号为 Sylramic，目前该技术已转给美国 COI 陶瓷公司，产量不详。德国 BayerAG 公司的 SiBN₃C 纤维，尚未有工业化生产的报道。

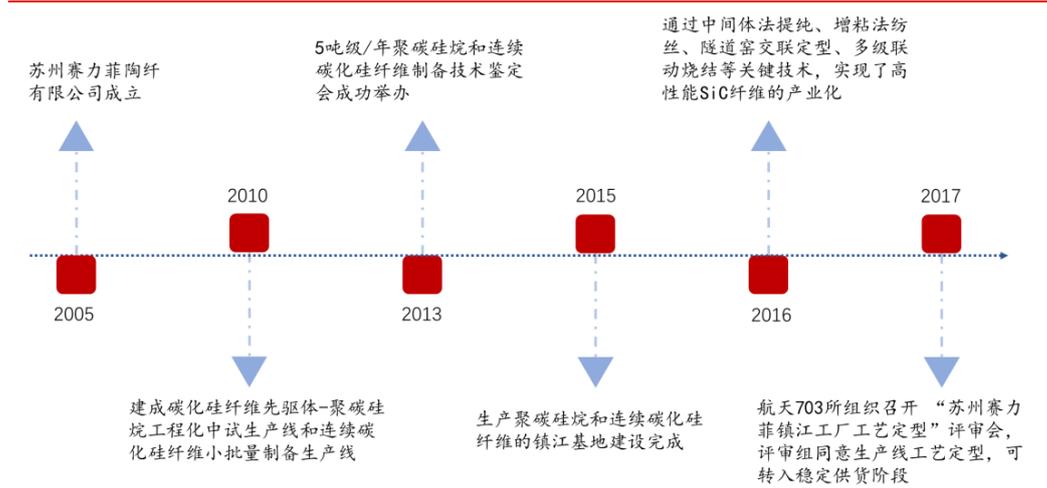
2013 年 GE 公司预测，未来 10 年对陶瓷基复材的需求将递增 10 倍，并于 2016 年投资建厂生产 SiC 纤维及复材。2016 年 6 月，GE 航空集团从日本 NGS 先进纤维公司获得纤维生产技术许可，投资 2 亿美元在亨茨维尔新建了两个 SiC 材料工厂，其中一个生产 SiC 纤维，另一个利用 SiC 纤维制备陶瓷基复合材料，工厂计划于 2020 年投产。一旦完全投产，两个工厂每年分别能够生产 10 吨 SiC 纤维和 20 吨 SiC 纤维增强复合材料。GE 正在努力将 SiC 基复合材料涡轮叶片应用在 GE9X、LEAP-X1C、F414 改型等新一代航空发动机上。

国内 SiC 纤维产业化已取得显著进步，但仍处于起步阶段，与日本等发达国家差距较大。据中航复材专家于 2016 年 12 月发表的《连续碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料研究进展》文献介绍：“国内 SiC 纤维产业化发展主要包括“十一五”和“十二五”两个五年计划，研制单位主要包括国防科技大学、厦门大学（含火炬电子科技股份有限公司）和苏州赛力菲陶纤有限公司。在国家大力支持和相关科研单位的努力下，已经实现了第一代 SiC 纤维工程化生产，突破了第二代 SiC 纤维研制关键技术。目前国内第二代 SiC 纤维处于中试阶段，生产能力达到 1 吨/年。总体而言，国内 SiC 纤维研究基础较弱，虽然取得了显著进步，但在质量稳定性和工业化能力方面与日本等发达国家的先进水平差距巨大。”

国防科大是国内最早建立 SiC 纤维中试生产线的单位，解决了有无问题，但产能有限。20 世纪 90 年代，国防科大完全自主建立了年产 100kg 级的 KD-I 型连续 SiC 纤维中试生产线，后又扩展到年产 500kg，并已供应给航空、航天、兵器等部门，在航空发动机、空间碎片防护等领域得到了应用。此后，国防科大又建立了年产 1 吨级的 KD-II 型纤维中试生产线，KD-II 纤维具备良好的编织性能，可以用于编织内锥体、回转体与销钉等构件，也已批量供应航空、航天、兵器等部门应用。

赛力菲是国内最早开展 SiC 纤维产业化的企业，产品结构丰富，一代 SiC 纤维已批量生产。苏州赛力菲陶纤有限公司与国防科技大学冯春祥教授合作，在苏州建厂进行连续 SiC 纤维产品的开发，产品涵盖陶瓷前驱体聚碳硅烷、连续碳化硅纤维、预制体、陶瓷微纳米粉体及制品、高性能纳米陶瓷/金属复合材料精密构件等。2013年1月，公司的“年产5吨聚碳硅烷的制备技术”和“年产吨级连续碳化硅纤维的制备技术”通过了江苏省国防科技工业办公室组织的成果鉴定。据赛菲集团董事长2012年在文献《连续 SiC 纤维制备技术进展及其应用》中报道：“公司的连续 SiC 纤维以‘赛力菲-SLF’商品名销售，其中 SLF-I 纤维含氧量在 15%-20%之间，SLF-II 纤维含氧量在 7%-12%之间，连续 SiC 纤维的长度为 500m，束丝根数 1k，直径 13 微米，单线年产已达到 1 吨连续 SiC 纤维的生产规模。”

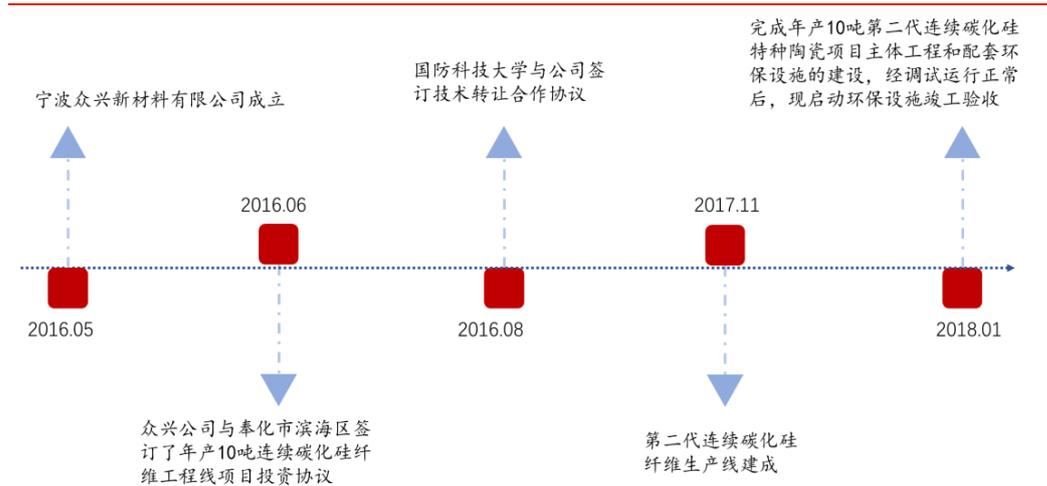
图表69：赛力菲发展历程



资料来源：公司官网，华泰证券研究所

宁波众兴引进国防科大二代 SiC 纤维制备技术，产线于 2017 年底建成。宁波众兴新材料科技有限公司成立于 2016 年，当年 8 月与国防科大签署了技术转让合作协议。据公司官网，2017 年 11 月产线建设完成，并生产出第二代碳化硅纤维；2017 年 12 月，10 吨级第二代连续碳化硅纤维量产生产线通过验收。

图表70：宁波众兴发展历程



资料来源：公司官网，华泰证券研究所

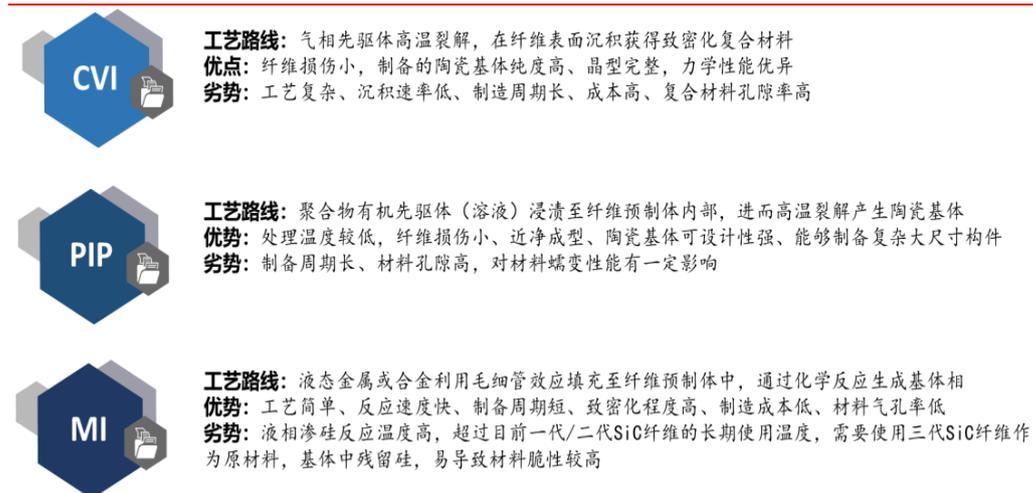
火炬电子从 2014 年开始布局 CASAS-300 材料产业化，目前已具备产业化能力。据公司 2017 年年报，目前公司 CASAS-300 特种陶瓷材料产业化项目进展顺利，已完成 5 吨/年的产能建设，2018 年上半年收到三个特种陶瓷材料相关项目收入合计 2576 万元，项目建设和市场前期开发进展顺利。

SiC 纤维增强复合材料制备技术逐渐成熟，促进产品应用

SiC 纤维能够编织成织物，也可以与金属、树脂、陶瓷等进行复合制备成复材，在航空航天等多个领域应用潜力大。SiC 纤维直径细，韧性好，易于编织成平纹、斜纹、菱形、透孔等平面织物，也可以通过 2.5D、三维编织成各种规格平板、工字梁、T 型梁、管材、棒材、纤维绳以及其他变截面立体织物等，还可以制成各种规格的 SiC 纤维毡。另外，还可以通过树脂、金属、陶瓷进行复合制成复材。具体来看，SiC 纤维增强金属基复合材料可以代替金属材料达到轻质高强的效果，例如，纤维体含量为 30% 的 SiC 纤维增强 Al 基复合材料，弯曲强度和拉伸强度较高，同时减重 40%，可用于制造导弹的尾翼炮管等；SiC 纤维与环氧树脂组成的复合材料与碳纤维相比具有较高的压缩强度和冲击强度，以及优异的耐磨损性，还具有优异的电性能，可使其广泛应用于雷达天线罩和飞行器的结构材料以及各种结构吸波材料。SiC 纤维增强陶瓷基复合材料主要应用于火箭和飞机喷气发动机的耐热部件、航天飞机的隔热瓦等。

连续 SiC 纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料 (SiC_f/SiC) 制备技术已经趋于成熟，部分技术成果已经成功应用到航空发动机热端部件上。SiC_f/SiC 常用的制备技术主要包括化学气相渗透法 (CVI)、聚合物浸渍裂解工艺 (PIP)、熔体浸渗工艺 (MI) 等，其中 MI 工艺优势明显，是 SiC_f/SiC 复合材料低成本、工程化技术较为理想的选择。

图表71：连续 SiC 纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料主要制备工艺比较



资料来源：新一代发动机高温材料-陶瓷基复合材料的制备，华泰证券研究所

国外 SiC_f/SiC 复合材料制备技术较为成熟，国内也已突破相关工艺。日本是开展 PCS 和连续 SiC 纤维研究最早的国家，其 PIP 制备工艺优势显著；德国和美国利用 MI 技术实现了 SiC_f/SiC 复合材料构件的批量化生产；法国以 CVI 技术为主，技术水平国际领先。中航工业复材中心和西北工业大学分别采用 PIP 工艺和 CVI 工艺进行 SiC_f/SiC 复合材料的研制，上海硅酸盐所和中南大学在 MI 工艺方面取得了显著的技术突破，总体来看，目前我国已经具备构件研制和小批量生产能力，但在产业化方面与西方发达国家尚存在明显差距。

目前主要用于制备高温结构复材、高温隐身材料和先进核能材料

美日等国已在高端装备中开始使用 SiC 纤维及 SiC 纤维增强复合材料，主要应用于制备高温结构复材、高温隐身材料和先进核能材料。日本与美国已经实现高性能连续 SiC 纤维的工业化生产，并应用于航空/航天发动机燃烧室、喷口导流叶片、涡轮叶片、涡轮壳环、尾喷管，空天飞行器机翼前缘、舵面，高超音速武器推进系统以及核燃料包壳管等部位。

SiC 纤维制备的高温结构材料主要用于航空航天领域，包括发动机的热端部件（主要用于燃烧室和涡轮）及飞行器的热防护系统等。航空发动机要求提高推重比和降低燃料消耗，根本措施是提高涡轮进口温度和降低结构重量，这就要求将航空发动机高温结构材料从高温合金、单晶向陶瓷基复合材料转变。在高温环境下，SiC_f/SiC 复合材料不仅能保持优异的比强度，还可以减轻涡轮叶片重量，减少冷却装置，且与高温合金叶片相比，具有更强的耐热腐蚀能力，对提升航空发动机推重比具有重要意义，GE 公司和 P&W 公司使用 SiC_f/SiC 复材制备燃烧室衬套，在 1200°C 环境下工作时间可以超过 10000 小时；GE 航空开发出 SiC_f/SiC 复材燃烧室火焰筒，能在 1200°C 环境下工作 9000 小时以上；GE 和 R-R 公司联合为 F-35 战斗机研制的 F-136 发动机采用了 SiC_f/SiC 复合材料第三级低压涡轮导向叶片，目前已有 10 万小时以上的测试记录。

图表72： SiC 基复合材料在航空发动机上的应用

发动机型号	材料体系	应用部位	应用机型	研制公司	效果
M88-2	SPECARB INOX+A262 Cr/SiC 复合材料	外调节片	阵风	斯奈克玛	2002年开始投入批产，在国际上首次实现陶瓷基复合材料在发动机上的应用
F119	SiC 复合材料	矢量喷管内壁板和外壁板	F-22	普惠	有效减重，从而解决飞机重心后移问题
F414	SiC 复合材料	燃烧室	F/A-18	通用	能够提供较大的温升，较长的寿命，需要的冷却空气较少
F100	SiCr/SiC	密封片	F-15 F-16	普惠	累计工作时间1300h，1200°C/100h，减重60%，SiCr/SiC 材料比金属密封片具有更好的抗热机械疲劳性能
F100-FW-229	SiC 密封片	密封片	F-15 F-16	普惠	进行了600h以上的地面试车试验，并在2005年和2006年通过F-16和F15E试飞试验
F110	SiCr/SiC	调节片	F-16 F-15E	通用	累计工作时间500h，1200°C/100h，增加推力35%，取样性能测试结果表明，SiCr/SiC无明显损伤
XTG76/3	SiCr/SiC	燃烧室火焰筒	预研	艾利逊/通用	火焰筒壁可以承受1316°C温度
XTC 77/1	SiC 复合材料	燃烧室火焰筒，高压涡轮静子叶片	预研	艾利逊/通用	改进了热力和应力分析，质量减轻，冷却空气量减少
XTC 97	SiC 复合材料	燃烧室	预研	艾利逊/通用	在目标油气比下获得较小的分布因子
XTE 76/1	SiCr/SiC	低压涡轮静子叶片	预研	艾利逊/通用	提高了强度和耐久性，明显减少了冷却空气需要量
EJ200	SiCr/SiC	燃烧室、火焰稳定器和尾喷管调节片	EF-2000	罗·罗等	通过军用发动机试验台，军用验证发动机的严格审定，在高温高压燃气下未受损伤
Trent 800	SiC 复合材料	扇形涡轮外环	A330等	罗·罗	可大幅度节省冷却空气量，提高工作温度，降低结构重量并提高使用寿命
F136	CMC	涡轮3级导向叶片	/	通用	耐热能力可达1200°C，重量仅有钛合金1/3，可能是陶瓷基复合材料在喷气发动机热端部件上得到的首次商业应用
Trent	CMC	尾椎	A330等	罗·罗	截至2013年1月，运行73h，未有热或结构应力问题发生
Leap-X	CMC	低压涡轮导向叶片	C919等	通用/斯奈克玛	质量仅为传统材料的1/2甚至更轻，但可以耐1200°C以上的高温，并且不需要冷却，易于加工

资料来源：新一代发动机高温材料-陶瓷基复合材料的制备，华泰证券研究所

2015年2月10日，美国GE公司在F414涡扇发动机验证机上成功验证了世界首个旋转低压涡轮构件，为SiC_f/SiC复材在航空发动机和燃气轮机上的应用指明了方向。2015年6月16日，法国赛峰集团设计的陶瓷基复合材料尾喷管搭载CFM56-5B发动机完成了首次商业飞行，通过适航认证，标志着航空发动机高温部件采用SiC_f/SiC复合材料的时代来临。

热防护方面，日本以SiC_f/SiC复材作为空天飞机HOPE-X的平面翼板及前沿曲面翼板等热保护系统；法国以SiC_f/SiC复材作为空天飞机HERMES的盖板隔热层；洛马公司采用SiC_f/SiC复材开发出来的耐热瓦已有3万余块用于美国哥伦比亚号航天飞机上，应用效果良好，自1981年以来哥伦比亚号共成功执行任务近30次。

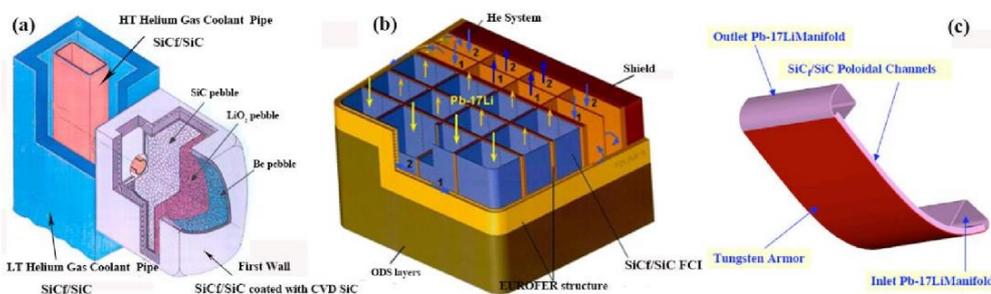
SiC纤维具有半导体特性，是雷达波吸收的重要材料，同时具有高温抗氧化性，适合用作高温隐身材料，可用于制造隐身飞机和巡航导弹的头锥、尾翼、鱼鳞板及尾喷管等。如法国“幻影2000”战斗机的M53发动机鱼鳞板内侧及尾喷管，美国洛马公司生产的F-22隐身战机的四个直角尾翼。

图表73: SiC 纤维作为高温隐身材料的应用



资料来源: KD 系列连续碳化硅纤维组成、结构与性能关系研究, 华泰证券研究所

图表74: SiC 纤维在先进核能领域的应用



资料来源: KD 系列连续碳化硅纤维组成、结构与性能关系研究, 华泰证券研究所

连续 SiC 纤维因其良好的辐照稳定性, 被认为在先进核能领域也具有广阔的应用前景, 目前 SiC 基 SiC 纤维复合材料 (SiC_i/SiC) 在核聚变反应堆的设计中已被采用, 主要是用在包层的第一壁、流道插件、控制棒以及偏滤器等部件上。如日本的 DRREAM 和 A-SSTR2 包层概念设计选用 SiC_i/SiC 复合材料作为第一壁/包层结构材料; 欧盟的 PPCS-C 的包层概念设计采用 SiC_i/SiC 复合材料制造流道插件; 美国的 ARIES-AT 的偏滤器设计中采取 SiC_i/SiC 复合材料作为结构材料。

国产纤维量产及复材制备技术逐渐成熟, 有望开启下游广阔市场空间

国产纤维的量产及复材制备技术的逐步成熟, 有望带动下游应用的快速增长。目前第三代 SiC 纤维的性能已基本满足实际应用的需要, 以第三代 SiC 纤维作为增强体的陶瓷基复合材料 (CMC) 研究已经广泛展开, 不仅可应用于航空航天发动机的耐热部件、可重复使用运载器的热防护材料系统和高超音速武器推进系统等, 在核能、高速刹车片、燃气轮机热端部件、高温气体过滤和热交换器等领域也有广泛的应用潜力。随着第一代、第二代、第三代 SiC 纤维的量产, 以及复材制备技术的逐步成熟, 未来有望带动航空、航天、核电等下游应用的快速增长。

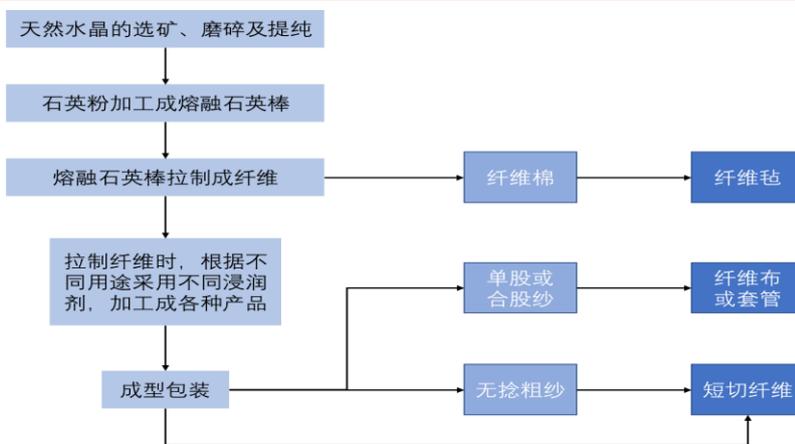
我国已开展发动机用 SiC 纤维复材研究, 实现了发动机的减重。据 2017 年 7 月 1 号《解放军报》报道, 某民企采用连续碳化硅纤维材料制作某型号发动机喷口调节片, 将耐高温性能提高了 150 度, 重量减轻了 8 公斤。我们认为, 未来伴随着国产发动机的批产上量, 以及新一代战斗机的研制推进, 对 SiC 纤维及其复材的需求将会逐步提升。

五、石英纤维：航空航天产业发展，带动需求快速上升

石英纤维是指二氧化硅含量达 99.95%以上，丝径在 1~15 微米的特种玻璃纤维，具有较高的耐热性，能长期在 1050℃以下使用，短期最高使用温度达 1200℃，软化温度为 1700℃，耐温性仅次于碳纤维。石英纤维有着卓越的电绝缘性，并且介电性能随着温度变化较小。石英纤维在高频和 700℃以下工作区域内，能保持最低而稳定的介电常数和介电损耗。这些优异的性能使之成为多种航空、航天飞行器关键部位的结构增强、透波、隔热材料。

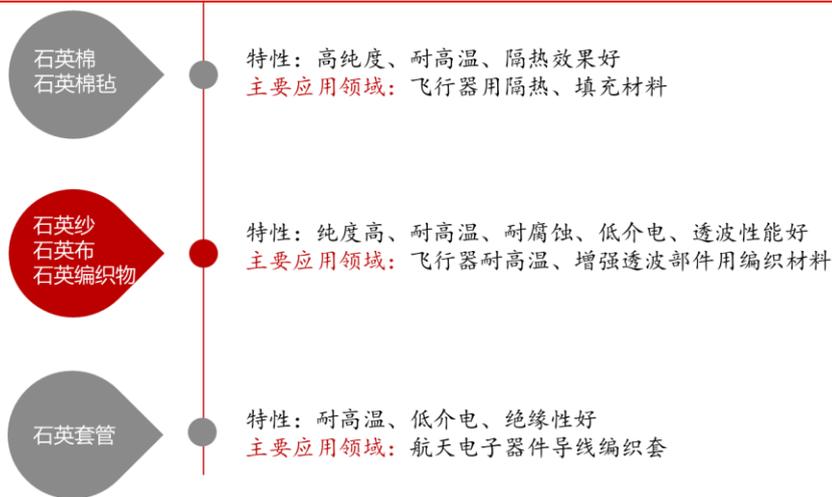
生产连续石英纤维的方法主要有三种：**棒拉丝法、熔融拉丝法和溶胶凝胶法**，其中工业生产主要以**棒拉丝法**为主。棒拉丝法一般是由纯的天然水晶提炼加工成熔融石英玻璃棒拉制而成。拉制完成后制备成不同的石英产品，如无捻粗纱、有捻纱（包括单股和合股纱）、纤维布、纤维套管、短切纤维、纤维棉、纤维毡和纤维砖等。

图表75：棒拉丝法生产石英纤维产品的工艺流程



资料来源：石英玻璃纤维的性能和用途，华泰证券研究所

图表76：石英纤维各种产品在军工领域用途



资料来源：石英纤维的性能及其应用，华泰证券研究所

石英纤维主要用作雷达罩透波及航天器隔热材料

石英纤维是高性能机载雷达罩常用的增强纤维之一

机载雷达的发展使其天线罩对力学性能和透波性能要求越来越高，而决定此两种性能的主要因素是制备天线罩用的复合材料。机载雷达天线罩的主要功能有：保证雷达天线系统工作不受环境干扰，避免雷达天线在恶劣飞行环境中受到损坏；透过电磁波；改善飞机气动

外形。天线罩用的复合材料对天线罩的力学性能和透波性能影响较大，复材的弯曲性能和抗冲击性能越好，机载雷达天线罩承载空气载荷的能力越强，抵抗飞行过程中异物冲击的能力越好；复材的介电常数（ ϵ ）和介电损耗角正切值（ $\tan \delta$ ）越低，其介电性能越好，雷达罩的透波性能越好。

图表77：机载及弹载雷达天线罩常用透波纤维及性能

纤维	密度 /g*cm ⁻³	拉伸强度 /GPa	杨氏模量 /GPa	E /10GHz	Tan δ /10GHz	最高工作温度 (氧化) /°C
E玻璃纤维	2.54	3.45	72.0	6.13	0.0038	700
S玻璃纤维	2.49	4.02	85.0	5.21	0.0068	500
M玻璃纤维	2.77	3.70	91.6	7.00	0.0039	450
D玻璃纤维	2.16	2.00	52.0	4.00	0.0026	450
硅氧纤维	2.20	1.70	72.0	3.78	0.0002	1060
高硅氧纤维	2.30	2.50	52.0	4.00	0.0048	500
氮化硼	2.20	2.20	170.0	4.20	0.0003	900
氮化硅	2.39	2.39	300.0	4.50	0.0040	1300

资料来源：新型石英纤维的表征及其石英基复合材料的制备与性能，华泰证券研究所

石英纤维透波性能较好，适用于高性能机载雷达罩，在美国 F-15、F-22 等战斗机中获得了应用。机载雷达天线罩常用的增强纤维包括普通玻璃纤维、石英纤维、高硅氧玻璃纤维等。其中玻璃纤维增强树脂基复合材料是实际生产中最广泛应用的雷达罩材料，其应用频段主要 10GHz 范围内，对于高频天线罩（10-20GHz），因其发射频率高，波长短，造成天线罩透波损耗大。石英纤维的介电性能比普通玻璃纤维更加优越， ϵ 值和 $\tan \delta$ 值在玻璃纤维体系中最低，且在较宽频带范围内基本不变化，因此可实现天线罩的宽频透波性，虽然价格较高，目前国外先进雷达罩大多已采用石英纤维作为增强材料。

1. 普通玻纤：E 玻纤是最早应用于机载雷达天线罩的透波增强材料，具有较高的拉伸强度、较好的耐老化性能、良好的介电性能，而且价格最低。但随着机载雷达天线技术的发展，它的某些性能已经不能满足特定使用要求，于是产生了改进型，得到了高强度玻纤（S 玻纤）、高模量玻纤（M 玻纤）和低介电玻纤（D 玻纤）。其中，S 玻纤力学性能是玻纤中最好的，介电损耗角正切值较大，可用于制备对结构性能要求较高、介电性能要求一般的机载雷达天线罩；M 玻纤是玻纤中模量最高的，但介电常数较大，较少用于制备机载雷达天线罩；D 玻纤是国外专门为制造天线罩而最早开发利用的一种玻纤，目前国内也已经大量生产，其 ϵ 值和 $\tan \delta$ 值仅次于石英玻纤，但拉伸强度和模量稍低，可用于制造对电性能要求较高、而对力学性能要求一般的机载雷达罩。
2. 高硅氧玻璃纤维：高硅氧纤维是俄罗斯特有的透波复合材料用增强材料，具有较好的耐热性能和优异的介电性能，非常适合作为战术导弹雷达罩的增强材料，也常用于制备机载雷达天线罩。高硅氧纤维强度与一般纤维接近，性价比在石英纤维与 E 玻璃纤维之间。
3. 石英纤维：石英纤维是高性能机载天线罩最常用的增强纤维，它隔热性能优良，与酚醛树脂、环氧树脂都有很好的兼容性，并且具有弹性模量随温度升高而增加的罕见特性；介电性能十分优异， ϵ 值和 $\tan \delta$ 值在玻璃纤维中最低，并且在较宽的频带范围内基本不变化。石英纤维在实际中得到大量应用，如美国 F-15 战斗机第一代、第二代鼻锥天线罩都采用了石英纤维增强聚酰胺树脂复合材料作为夹层结构的蒙皮，国外第四代战斗机（如美国 F-22 战斗机）雷达罩也都选用了宽频性能极佳的石英纤维。

石英纤维在导弹天线罩中应用广泛，国内外仍在不断改进提升

与飞机天线罩类似，导弹天线罩的功能是确保弹载雷达导引头在飞行过程中的正常工作，天线罩材料需要满足导弹力学性能、介电性能、抗热震、抗雨蚀、寿命、工艺等要求。连续纤维增强陶瓷基复合材料由于既能从本质上克服陶瓷材料的脆性，又能保留陶瓷基体材料强度高、热膨胀系数小和热稳定性好等优点，成为近年来制备高马赫数导弹天线罩的主要材料体系之一，使用的陶瓷纤维主要包括玻璃纤维、石英纤维、氮化硼（BN）纤维、氮化硅（ Si_3N_4 ）纤维等。

石英纤维是国外高马赫数导弹天线罩最常用的耐高温透波陶瓷纤维，但仍有性能限制，国内外均在不断改进。S玻纤、D玻纤及高硅氧玻纤等玻璃纤维是使用最早的导弹天线罩增强材料，但这些普通玻纤受密度与耐温性的限制，难以满足制备高马赫数导弹天线罩的需求。石英纤维综合性能优良，是高马赫数导弹天线罩透波材料的理想增强体，应用较为广泛，但当温度达到 900°C 时，石英纤维会发生析晶现象，强度迅速下降，大大影响复合材料的力学性能，当温度达到 1200°C 时，其增强作用基本消失殆尽，这严重限制了石英纤维的应用范围。国内外均在不断进行材料的改进，例如美国Philco-Ford公司和GE公司制备出三维多向石英纤维织物增强的石英基复合材料，表面熔融温度可达 1735°C ，应用于美国“三叉戟”导弹；俄罗斯研发了石英纤维增强磷酸盐基的复合材料，在温度高达 1800°C 的条件下也能维持较为优良的性能，已运用在各类巡航导弹、战术型、反导型导弹及航天飞机上。

石英纤维是目前国内最主要的用于中高马赫导弹天线罩的透波增强纤维。针对中、远程地地战术和战略导弹天线罩需求，国内多家单位也成功研制了石英纤维织物及复材，如北京玻璃钢研究设计院研究了石英玻璃布增强磷酸盐复合材料，可用于使用温度在 1200°C 以下的天线罩；国内研发的三维石英纤维增强石英基复材已经在航空航天领域的某些型号上得到实践应用。石英纤维是目前国内最主要的用于中高马赫导弹天线罩的透波增强纤维，但随着中远程精确制导导弹的发展，导弹的飞行时间进一步增加，再入速度可高达20马赫以上，这使得导弹天线罩的工作温度急剧上升，石英纤维难以满足这种工况，因此，国内也在研发 Si_3N_4 纤维、BN纤维、SiNO纤维和SiBN纤维等其他类型耐高温透波陶瓷纤维。

石英纤维可应用于航天器作为热防护材料

陶瓷纤维刚性隔热瓦是美国航天飞机最主要的热防护材料，在X-37、X-51等新型高超声速飞行器中也有应用。陶瓷纤维刚性隔热瓦孔隙率高，容重低，在高温下具有稳定的形状和一定的强度，同时具有优良的辐射散热、隔热、抗冲刷和保持气动外形的作用，是目前美国航天飞机最主要的热防护材料之一，应用面积占航天飞机总热防护表面的68%，世界上第一架航天飞机“哥伦比亚”号表面贴了24300块陶瓷纤维隔热瓦。近年，X-37、X-51等高超音速飞行器的热防护系统也应用了陶瓷纤维刚性隔热瓦。

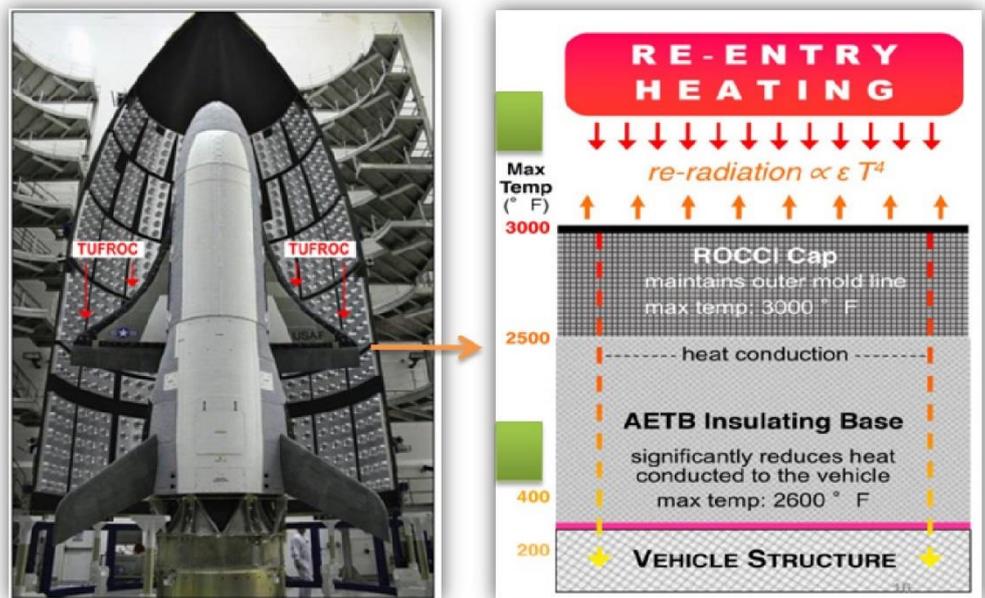
图表78： 石英纤维在高超声速飞行器上的应用

应用方向	类别	牌号	纤维组分(质量分数)	应用情况
刚性隔热瓦	第1代	LI	石英纤维(100%)	应用于美国“哥伦比亚号”、“挑战者号”航天飞机
	第2代	FRCI	石英纤维(78%) +硼硅酸铝纤维(20%)	应用于美国“挑战者号”、“亚特兰蒂斯号”航天飞机, 单次飞行耐温1537°C, 重复使用温度达1367°C
		AETB	石英纤维(68%)+硼硅酸铝纤维(12%) +氧化铝纤维(20%)	应用于美国“奋进号”航天飞机, 重复使用温度达1530°C; 2次应用于X-43A高超声速飞行器, 分别实现了6.8马赫、9.8马赫飞行
	第3代	HTP	石英纤维(74.4%) +氧化铝纤维(21%)	使用温度高于1427°C
		BRI	石英纤维(60%-80%) +氧化铝纤维(20%-40%)	应用于美国“发现号”航天飞机, 短时耐温达1537°C; 应用于X-51A高超声速飞行器迎风面
	第4代	TUFROC	外层为难熔抗氧化的轻质陶瓷/碳隔热材料(ROCCI), 内层为AETB或FRCI	应用于X-37B高超声速飞行器头锥及迎风面, 重复使用温度达1700°C

资料来源：《高超声速飞行器陶瓷复合材料与热结构技术研究进展》，华泰证券研究所

刚性隔热瓦发展至今已有4代，石英纤维均是重要的增强纤维。美国陶瓷纤维刚性隔热瓦的研制工作始于20世纪60年代，Lockheed公司于1972年研制出了采用石英纤维作为增强纤维的第一代陶瓷纤维隔热瓦，并于1975年扩大生产。美国陶瓷纤维刚性隔热瓦发展至今大致经历了四代，耐热能力不断提升，其中均用到了大量的石英纤维作为增强材料，主要是由于石英纤维能在高温下融化吸收热量，并进一步利用熔融的液态层来阻挡热流，是融化型烧蚀耐热材料的典型代表。

图表79： TUFROC 防隔热一体化复合结构示意图



资料来源：空天飞行器用热防护陶瓷材料，华泰证券研究所

菲利华是国内唯一的石英纤维规模化生产企业

菲利华是国内最早开始生产石英纤维的企业，也是目前国内唯一能规模化生产石英纤维的企业。石英纤维的生产最初源于法国，之后美日英俄等国也形成了规模化的生产。2002年以前，我国石英纤维主要是纱线和短切丝等，仅有菲利华一家公司生产平纹石英布，高性能石英布只能依赖于从法国、俄罗斯等国进口，受制约较多，很难满足项目进度要求。菲利华从2002年开始研制生产高性能石英布，经过几年努力开发出多个牌号如QW220、QW280和QW120等高性能石英布，产品性能优良、质量稳定，并能满足技术要求，已应用于多种军工产品上。目前，在国内能规模化生产石英玻璃纤维的公司只有菲利华，公

司在石英纤维方向的产品主要包括石英纤维纱、超细石英纤维丝、定长石英纤维丝、石英纤维棉、石英纤维布、石英纤维套管、三维纺织预制件等。

图表80： 石英纤维纱



资料来源：菲利华公司官网，华泰证券研究所

图表81： 石英纤维三维纺织预制件



资料来源：菲利华公司官网，华泰证券研究所

图表82： 国内军用石英纤维及其制品产业链



资料来源：新型石英纤维的表征及其石英基复合材料的制备与性能，华泰证券研究所

航空航天产业发展，有望带动石英纤维需求提升

中远程战略战术弹道导弹是火箭军的主要作战装备，防空反导系统是空军防空兵以及海军防空型舰艇的主要武器；巡航导弹则横跨火箭军、空军和海军三个军种。我们认为，在陆、海、空、火箭军等下游军种需求刺激下，未来导弹需求量大。未来火箭军将围绕“核常兼备、全域慑战”的战略要求，积极加强中远程精确打击力量建设，增强战略制衡能力，导弹防务装备有望保持稳健快速的增长态势。石英纤维在导弹天线罩和壳体中都能取得应用，未来需求增长潜力大。

如前文所述，目前我国军机技术成熟，需求旺盛，已经进入批产拐点，石英纤维是军机雷达罩常用的纤维材料，伴随着军机的批产上量，对石英纤维的需求也将快速增长。

六、国内军工复材产业链重点公司

菲利华：专注高端石英，半导体及军工下游需求增长潜力大

国内石英材料及石英纤维制造龙头企业。菲利华主要从事半导体、光学、光通讯、航空航天及其他领域用高性能石英、石英纤维业务。在光通讯领域，在石英棒、石英管等方面已成为藤仓（中国）、住友电气、日本青峦等具备较强实力企业的主要供应商，同时也与国内前几名光纤光缆大厂亨通光电、长飞光纤等保持长期合作关系；在半导体领域，公司半导体产品进入国际主流供应商序列，是国际第五家、国内第一家获得国际主要半导体设备制造商认证的企业，主要客户为杭州大和热磁电子、杭州泰古诺石英、广东昭信半导体等；在航空航天领域，公司是该领域唯一的石英纤维供应商。

图表83： 菲利华营业收入及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

图表84： 菲利华归母净利润及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

半导体产品进入主流供应商序列，光学新品有望成新盈利点。菲利华半导体石英锭 2011 年通过东京电子认证，是国内首家半导体材料通过国际主设备商认证的企业，供应用于半导体蚀刻环节的石英材料。目前，公司已通过美国应用材料公司 AMAT 及 LamResearch 的认证的石英材料规格达 20 种。下游客户认证周期长，市场准入壁垒高，保障公司产品后续持续有序成长。2015 年显示屏用光掩膜基板开始放量，公司是国内首家具备生产 8 代大尺寸光掩膜基板的生产企业，目前已形成从 4.5 代到 8 代的完整产业链，产品应用于 TFT-LCD、OLED 显示屏，我们预计未来将受益于显示屏大屏化、以及 OLED 渗透率提升。

光纤预制棒产能向国内转移，带来上游元器件更多机会。公司与国内前几名光纤光缆大厂保持长期合作关系，我们预计未来有望增加供应更多高端产品。目前我国预制棒套管仍主要依赖于进口。我们认为随着光纤预制棒产能向国内迁移，公司凭借强大的产品研发实力，未来有望增加对下游客户的开发力度，填补光纤预制棒套管的空白。

石英纤维及复材业务有望受益于下游航空航天产业发展。石英纤维全球仅有少数几家公司能生产，公司是国内唯一石英纤维规模生产企业。石英纤维业务盈利能力强，伴随着下游航空航天产业的发展，公司有望显著受益。另外公司将发展大口径高精度光学元件，特别是钽玻璃加工、600 干涉仪标准镜及防溅射玻璃等，我们预计公司产品有望应用到国家核聚变“神光计划”，成为高端激光元器件供应商。

扩建自动化产能，加大高端应用布局。公司的募投项目“电子信息产品用石英材料及制品生产建设项目”已于 2016 年 11 月在潜江投产运营，新工厂新增 200 吨/年的合成石英锭产能，主要用于光掩膜基板、精密光学用制品的生产；新增 2400 吨/年天然料石英锭产能，主要用于半导体、太阳能用石英锭、石英筒、石英管、石英板片环等制品的生产。潜江新工厂率先应用智慧工厂标准建设，使用 RFID、ERP、CRM 系统，实现石英材料自动化、智能化制造，有效控制成本。

光威复材：民族之光引领碳纤维产业发展，军民两端应用前景广阔

军用碳纤维行业领军企业，产品在军民两端应用广泛。光威集团从1999年即开始碳纤维研究，是国内最早开展碳纤维研制的企业之一，经过20年的发展目前已成为碳纤维行业领军企业，被师昌绪院士誉为“民族之光”，并亲笔题词“发扬威海精神，创建中国碳纤维基地”。光威复材拥有从原丝开始的碳纤维、织物、树脂、高性能预浸材料、复合材料制品的完整产业链，并具备核心设备研制能力，产品已经应用于航空、航天、舰船、风电、体育等领域。2018年12月20日，公司获得第一届“师昌绪新材料技术奖”，成为全国获得该奖项的3家单位之一。

图表85：光威复材营业收入及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

图表86：光威复材归母净利润及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

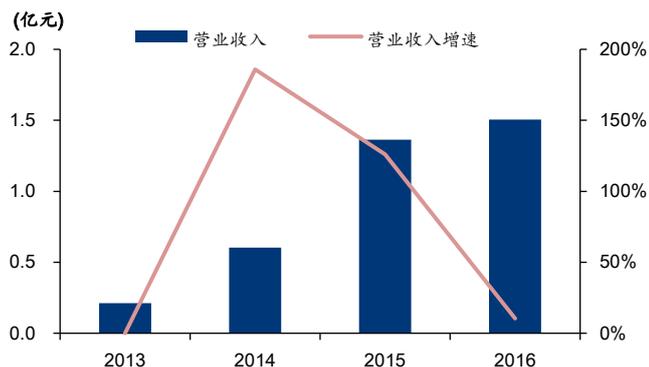
下游军工装备列装持续增长，且新一代武器装备碳纤维应用较老装备大幅提升，带动军用碳纤维需求快速增长。根据装备建设五年规划前低后高的规律，十三五后期军工装备生产及列装有望持续增长，且过去两年受军改和改革落地慢影响，军工下游装备批产及列装不及预期，我们认为未来两年下游军工装备可能会有补偿性增长。另外，新一代武器装备的碳纤维及复材用量也高于老装备，如四代机复材占结构件比例已达20%，比三代机高一倍，这批新装备的批产上量有望带动国产碳纤维需求的大幅提升。据公司公告，公司T300级碳纤维已在航空航天大量应用十余年，是型号用国产碳纤维的主供应商；T800H项目已具备批量生产能力，并开始有部分型号上小批量供货；CCF700G级碳纤维具备了该级别碳纤维在涉军装备上进行设计应用的基础条件。我们认为，伴随着航空航天等高端军工装备产业的发展，公司作为军用碳纤维龙头，有望充分受益。

碳纤维民用前景广阔，目前公司碳纤维产品已经在风电领域取得规模应用，且大丝束项目已经实现小批量生产，未来民品业务有望保持高速增长。除了军用领域，碳纤维在工业领域和体育休闲用品领域也有广阔的应用前景。目前公司已与风电巨头 Vestas 签订合作谅解备忘录，将与 Vestas 共同推动碳纤维在碳梁产品上的应用和推广，2017年公司已经开始在全球范围内批量供货，供货值达2.6亿元，成为 Vestas 碳梁最主要供应商。另外，据公司公告，公司24K大丝束项目实现小批量生产，产品性能与国外同级别产品水平相当，并通过验证成为风电碳梁项目的合格供应商。大丝束碳纤维成本显著低于小丝束碳纤维，公司24K大丝束碳纤维的批产，有助于提升公司在民用领域的竞争力，未来公司民用碳纤维业务有望保持高速增长。

中简科技：军用 ZT7 碳纤维核心供应商，积极开发其他类型碳纤维

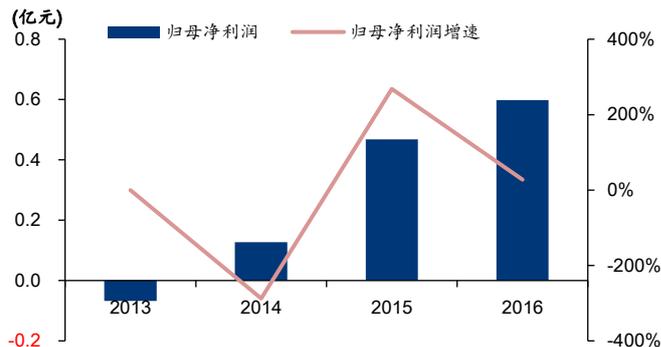
中简科技是国内军用 ZT7 系列碳纤维唯一批量稳定供应商。中简科技具备高强度 ZT7 系列（高于 T700 级）、ZT8 系列（T800 级）、ZT9 系列（T1000/T1100 级）和高模型 ZM40J（M40J 级）石墨纤维工程产业化能力，并已成为国内航空航天领域 ZT7 系列碳纤维产品的批量稳定供应商，公司的 ZT7 系列碳纤维产品打破了发达国家对宇航级碳纤维的技术装备封锁，各项技术指标达到国际同类型产品先进水平，经过严格的产品验证，已被批量稳定应用于我国航空航天八大型号。目前中简科技正在 IPO 排队中。

图表87：中简科技营业收入及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

图表88：中简科技归母净利润及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

ZT7 系列碳纤维是公司主要收入来源，公司业务中军品占比较高，毛利率较高。据公司 2017 年发布的招股说明书，公司拥有一条 150 吨/年（12K）或 50 吨/年（3K）高性能碳纤维生产线，主要用于批量生产 ZT7 系列碳纤维和研发新产品。ZT7 系列碳纤维力学性能介于日本东丽 T700 级与美国 IM7 之间，拉伸模量高于东丽 T700 级碳纤维，综合性能优于日本东丽 T700S 级碳纤维。2016 年公司销售收入 1.5 亿元，其中军品销售收入占比达 99.74%，产品毛利率达 67.85%。

公司正在积极开发其他类型碳纤维。据公司公告，公司以 ZT7 系列碳纤维研发为切入点，开展以 T800 级、T1000 级、T1100 级碳纤维为代表的高强度碳纤维和 M40J、M55J、M60J 为代表的高模高强碳纤维的研发工作，ZT8 系列碳纤维率先通过科技部的评价，性能达到 T800 级碳纤维；ZT9 系列碳纤维已通过北京航空航天大学的检测，性能相当于 T1000 级碳纤维，拉伸模量超过 T1100 级碳纤维；M55J 和 M60J 高强高模碳纤维已突破了制备技术，目前正在进行工程规模化转化。

火炬电子：军用 MLCC 核心供应商，布局新材助腾飞

火炬电子深耕陶瓷电容器多年，是军用 MLCC 核心供应商。受益于下游军工产业发展及民用 MLCC 供不应求，公司传统电容业务增长显著。公司 2016 年推出火炬牌钽电容器，在军民两端大力推广，预计将会进一步提升公司盈利水平。公司通过合作研发掌握了 CASAS-300 材料产业化技术，并开始了产业化项目建设，设计产能 10 吨/年，目前已实现 5 吨/年。

图表89：火炬电子营业收入及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

图表90：火炬电子归母净利润及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

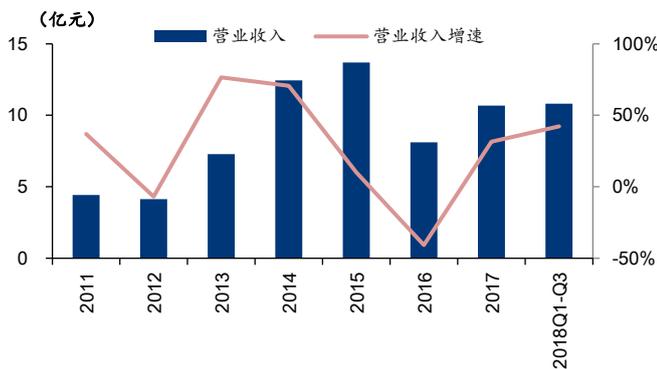
立足军民用 MLCC 主业，外延拓展新型电容产品。电容器业务是公司自成立以来主要业务，包括代理和自产两部分。2017 年以来，由于日韩 MLCC 大厂产能向高端产品转移，常规 MLCC 供给收缩，同时 MLCC 原材料价格也在上涨，导致 MLCC 售价不断攀升，使得公司代理业务及自产民品业务较为受益。军用 MLCC 市场格局较稳定，公司是军用 MLCC 核心供应商，将充分受益于军工产业大发展。此外公司还在积极布局钽电容器、超级电容器和脉冲功率陶瓷电容等系列产品，目前公司正在军民两个市场大力推广钽电容器，未来有望形成新的利润增长点。

陶瓷材料生产稳步推进，前三季度合同及项目收入合计 3669 万元。CASAS-300 特种陶瓷材料性能优异，具有低密度、高温抗氧化、耐腐蚀、低热膨胀系数、低蠕变等优点，可用于航空、航天、核电等多个领域，但该材料生产难度高，目前仅少数发达国家能够产业化生产，国内该材料的产业化能力较差。公司于 2016 年开始产业化项目建设，2017 年完成 5 吨/年的产能建设，并实现 648 万元销售收入。据公司三季报，公司前三季度陶瓷新材料主营业务收入达 1728 万元，项目收入达 1941 万元。该材料售价昂贵，据公司公告约 5 万至 6 万元/kg，未来随着下游需求的增长以及产能的逐步释放，将会显著增强公司竞争力和盈利能力。

隆华科技：业务转型升级，外延布局军工复材

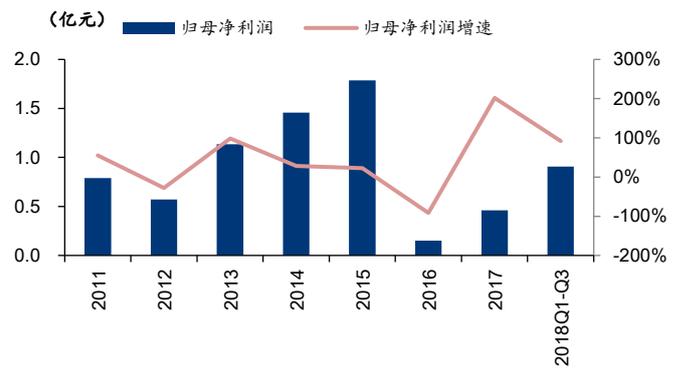
二次腾飞战略指引下，传统主业企稳回升，新材料业务有望逐步放量。公司从2015年开始提出“业务全面转型、实现二次腾飞”中长期发展战略，目标是转型发展为高科技产业集团，目前各板块业务发展良好。传统换热业务受下游低迷影响在2016-2017年连续亏损，公司主动调整，2018年有望企稳回升；环保业务领域近年始终发展稳定；靶材领域，公司的产品已经用于进口替代进入批量供货期，我们认为未来随着下游需求提升、扩产产能释放业绩将会逐步提升；军工材料领域，公司的产品在多型装备中获得应用，未来也将受益于军工产业发展。

图表91：隆华科技营业收入及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

图表92：隆华科技归母净利润及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

靶材业务：显示靶材领先启航，阶梯式分布助成长。公司在靶材领域业务主要由四丰电子和晶联光电承担，分别从事 TFT 显示用钼靶材和 ITO 靶材研制生产。四丰电子钼靶材产品已成功进入京东方多条线的批量供应。晶联光电于 2017 年先后通过多条 TFT 面板线的测试认证并实现批量供货，开创了 ITO 靶材的国产化历史。下游 TFT-LED 显示企业积极扩产，对靶材的需求将会越来越大，公司也在不同产品线上都有着稳定的扩产计划，未来投产后有望增厚业绩。

军工业务：外延布局军工复材，开启军民融合广阔空间。公司在军工领域业务主要由湖南兆恒和咸宁海威承担，其中兆恒主要产品为 PMI 泡沫，目前是国内唯一为多型军用飞机、雷达装备提供 PMI 材料的合格供应商；海威主要生产舰船复材，已为多种舰船和海洋装备提供轻质结构功能一体化复材产品。随着下游军工行业发展，未来对 PMI 泡沫材料和舰船复材的需求有望不断增加，兆恒与海威位处行业前列有望持续受益。公司还在民用领域大力推广公司产品，未来有望开启广阔军民融合空间。

传统业务：加强管理转变理念，传统业务稳步发展。公司传统业务包括传热节能业务及环保水处理业务。公司通过主动转变经营理念与模式、产品与市场结构，传热节能板块业务开始企稳回升，上半年传热业务收入和毛利率都有较大幅度提升。环保业务近年发展稳定，未来公司将继续在工业和市政环保市场精耕细作，突出风险管理，保证在建和运营项目的边际效益最大化。2018 年 10 月，公司中标阜阳市颍泉区乡镇污水处理及水环境治理 PPP 项目，金额达 10.76 亿元。

楚江新材：铜加工龙头，积极布局高端装备和军工材料

铜加工龙头，产能稳步扩张，优化产品结构，提高附加值。楚江新材是我国铜加工龙头，铜板带材和铜合金线产能国内第一。公司基础金属产品具有小批量、多品种、个性化、交货快等特点，17 年实现高精度铜合金板带材产量 16.84 万吨，国内市场占 9.65%，国内产量第一；废杂铜使用占比属国内最高水平（约 70-80%）。17 年优化产品结构，在稳定电工材料、连接器、电子电器、服装辅料、五金工具等传统行业的基础上，向消费电子、新能源、LED、高铁护套、汽车连接器等新兴行业拓展。未来公司将通过技改和铜板带产能扩张、实施行业内整合，扩大销量，同时优化客户结构提高附加值，夯实铜加工业务，扩大领先优势。

图表 93：楚江新材营业收入及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

图表 94：楚江新材归母净利润及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

依托顶立科技装备制造和材料工艺优势，发展高端装备和军工材料。顶立科技是国内 30 立方米热工装备唯一供应商，已成为航天航空和军工客户的核心供应商。在稳定已有热工装备基础上，公司充分发挥在高端热工装备制造技术与新材料制造工艺的优势，积极布局军工材料，是国内唯一具有碳及碳化硅复合材料装备、高端真空热处理、粉末冶金装备且均保持行业领先的高端热工装备龙头，并逐步向高温合金、特种功能材料、再制造材料等复合材料延伸。重点研发军品配套项目高纯石墨、碳碳复合材料，与运载火箭研究院合作的国家智能制造专项，实施纳米钨基材料产业化和碳纤维复合材料热工装备等项目，16 年公司建成金属 3D 打印粉体生产线，用于航天结构件、承重件、航空发动机高温合金涡轮盘等军工领域，并且颗粒细粉率、致密度等性能均已达到国际领先水平，获得客户认可。

拟收购江苏天鸟，进军纤维编织件制造。2018 年 8 月，公司发布公告拟收购江苏天鸟，目前证监会已经正式受理申请。江苏天鸟主要从事高性能碳纤维织物、芳纶纤维织物、飞机碳刹车预制件、航天用碳/碳复合材料预制件等制备，是国际航空器材承制方的 A 类供应商。2017、2018H1 分别实现净利润 0.39、0.25 亿元，并承诺 18-21 年扣非净利润不低于 0.6、0.8、1.0、1.1 亿元。收购后公司旗下高端热工装备及新材料研发制造子公司顶立科技和天鸟有望实现资金、技术和客户资源的优势互补。

中航高科：航空复材与高端制造双轮驱动，军民融合前景广阔

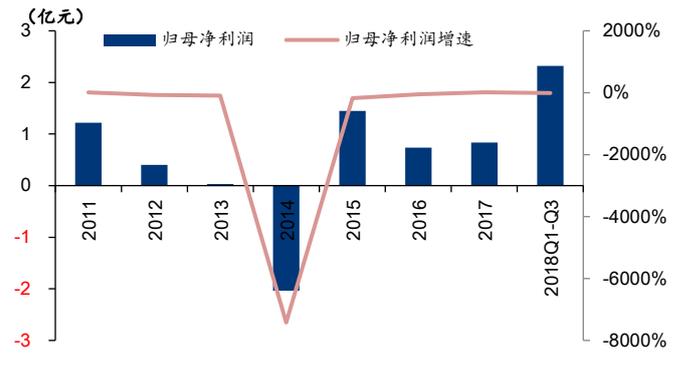
中航高科前身为南通科技，南通科技原有业务为机床生产销售和房地产开发，2014年公司通过股权划转、资产出售、购买资产及募集配套资金的一系列交易，剥离从事热加工的通能精机，同时收购中航复材、优材京航和优材百慕 100% 股权，将主营业务延伸到了航空新材料领域。重组完成后，公司控股股东为中航高科技，实际控制人为中航工业。公司已发布 2018 年业绩预告，预计 2018 年归母净利润为 3.09 亿元左右，同比增加 270% 左右。

图表95： 中航高科营业收入及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

图表96： 中航高科归母净利润及增速



资料来源：Wind，华泰证券研究所

依托中航复材，军民航空复材制造业务前景广阔。中航复材是中航工业集团下属唯一专门从事复材研制生产的企业，主要向西飞、成飞、沈飞等中航工业各航空整机制造厂提供复合材料用树脂基体及其预浸料、蜂窝等产品。公司在航空级别的 NORMEX 蜂窝、航空高性能树脂、航空高性能预浸料及其复合材料等市场均具有较高的市场份额，并且在民机、汽车、高铁等民用复合材料构件领域具有良好的发展前景。从已发布的业绩预告来看，2018 年公司航空复材业务收入呈现稳定增长态势，净利润同比增加约 5100 万元。

传统机床业务正在转型升级，瞄准高端装备，房地产业务非公司主业，未来将有序退出。机床业务是公司传统业务，也是近年主要的亏损源。公司机床业务目前正在转型升级，目标是成为中航工业机器人和智能制造平台。2015 年底公司与中航工业制造所合作，2016 年公司组建了航智科技，旨在将原有机床业务改造升级为数控机床及航空专用装备业务，明确定位高技术、高端装备、高附加值。房地产业务也是公司传统业务，未来将逐步退出。从已经发布的业绩预告来看，机床业务 2018 年同比减亏约 4600 万元；房地产业务 2018 年收入规模收窄，公司通过加强管理提升，净利润同比增加约 1400 万元。

风险提示：

1、军费增长不达预期风险

军工行业与军费景气度密切相关，也与国家军事战略及国际形势相关，国际环境和军费增长低于预期均可能直接或间接对装备需求造成不利影响。

2、改革进度不达预期风险

军工复材产业的发展受国家政策、行业发展政策的影响，相关政策的进度不达预期对军工复材产业上下游公司的生产、销售和回款可能会产生影响。

3、武器装备研制进度不达预期风险

军工复材行业属于军工行业的上游，如果武器装备研制进度不达预期，将对军工复材产业链相关公司业绩产生不利影响。

免责声明

本报告仅供华泰证券股份有限公司（以下简称“本公司”）客户使用。本公司不因接收人收到本报告而视其为客户。

本报告基于本公司认为可靠的、已公开的信息编制，但本公司对该等信息的准确性及完整性不作任何保证。本报告所载的意见、评估及预测仅反映报告发布当日的观点和判断。在不同时期，本公司可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。同时，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动。本公司不保证本报告所含信息保持在最新状态。本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本公司力求报告内容客观、公正，但本报告所载的观点、结论和建议仅供参考，不构成所述证券的买卖出价或征价。该等观点、建议并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对客户私人投资建议。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及作者均不承担任何法律责任。任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

本公司及作者在自身所知情的范围内，与本报告所指的证券或投资标的不存在法律禁止的利害关系。在法律许可的情况下，本公司及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券头寸并进行交易，也可能为之提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务。本公司的资产管理部、自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。

本报告版权仅为本公司所有。未经本公司书面许可，任何机构或个人不得以翻版、复制、发表、引用或再次分发他人等任何形式侵犯本公司版权。如征得本公司同意进行引用、刊发的，需在允许范围内使用，并注明出处为“华泰证券研究所”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。本公司保留追究相关责任的权力。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

本公司具有中国证监会核准的“证券投资咨询”业务资格，经营许可证编号为：91320000704041011J。

全资子公司华泰金融控股（香港）有限公司具有香港证监会核准的“就证券提供意见”业务资格，经营许可证编号为：A0K809

©版权所有 2019 年华泰证券股份有限公司

评级说明

行业评级体系

一 报告发布日后的 6 个月内的行业涨跌幅相对同期的沪深 300 指数的涨跌幅为基准；

一 投资建议的评级标准

增持行业股票指数超越基准

中性行业股票指数基本与基准持平

减持行业股票指数明显弱于基准

公司评级体系

一 报告发布日后的 6 个月内的公司涨跌幅相对同期的沪深 300 指数的涨跌幅为基准；

一 投资建议的评级标准

买入股价超越基准 20% 以上

增持股价超越基准 5%-20%

中性股价相对基准波动在 -5%~5% 之间

减持股价弱于基准 5%-20%

卖出股价弱于基准 20% 以上

华泰证券研究

南京

南京市建邺区江东中路 228 号华泰证券广场 1 号楼/邮政编码：210019

电话：86 25 83389999/传真：86 25 83387521

电子邮件：ht-rd@htsc.com

深圳

深圳市福田区益田路 5999 号基金大厦 10 楼/邮政编码：518017

电话：86 755 82493932/传真：86 755 82492062

电子邮件：ht-rd@htsc.com

北京

北京市西城区太平桥大街丰盛胡同 28 号太平洋保险大厦 A 座 18 层
 邮政编码：100032

电话：86 10 63211166/传真：86 10 63211275

电子邮件：ht-rd@htsc.com

上海

上海市浦东新区东方路 18 号保利广场 E 栋 23 楼/邮政编码：200120

电话：86 21 28972098/传真：86 21 28972068

电子邮件：ht-rd@htsc.com