

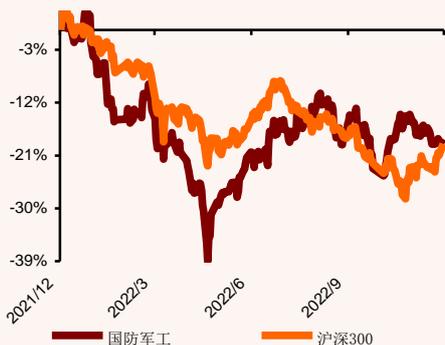
分析师： 鲍学博
 登记编号： S1220521040001

联系人： 王煜童

重要数据：

上市公司总家数	96
总股本(亿股)	993.41
销售收入(亿元)	4770.70
利润总额(亿元)	279.02
行业平均 PE	78.04
平均股价(元)	32.68

行业相对指数表现：



数据来源：wind 方正证券研究所

相关研究

《隐身技术系列深度之一：国外篇——隐身技术发展及典型隐身装备》2022.12.05

《方正军工周报 12 月第 1 周：军工央企股权激励计划接连推出，B-21 突袭者首次亮相》2022.12.04

《2023 年军工行业策略报告：航空航天景气有望延续，关注新技术、新产品、新市场》2022.12.03

《方正军工周报 11 月第 4 周：首台国产 50MW 重燃完工发运，国产燃机发展有望加速》2022.11.28

隐身技术的应用大大提高了武器装备的作战性能，形成了不可估量的军事和经济效益。隐身武器的应用彻底打破了敌对双方原有的进攻和防御平衡态势：一方面，隐身技术的使用降低了己方武器装备投入，优化了资源配置；另一方面，隐身武器增加了敌方防御投入，实现了战略威慑。据统计，反隐身的成本是隐身技术本身成本的 10 倍以上。

隐身技术按应对的探测手段可分为可见光隐身、雷达隐身、红外隐身、激光隐身、声隐身等。雷达隐身是隐身领域最主要的需求，采用的技术手段包括外形隐身技术和材料隐身技术等，以战斗机为例，其进气道、座舱、雷达天线舱、其他射频天线、发动机尾喷管、机翼前后缘为主要雷达散射源，分别采取了外形隐身、涂覆吸波材料、采用结构隐身材料等手段实现隐身能力；红外隐身是第二大隐身需求，采用的技术包括控制物体表面的发射率、控制物体表面温度等。单一频段隐身材料在战场上应用受限，多频谱隐身材料是未来隐身材料重要发展方向。

隐身材料按成型工艺和承载能力可分为涂覆型和结构型两类。涂覆型隐身材料涂于目标表面形成吸波涂层，这类材料一般是由吸收剂和基体材料两部分组成，雷达吸波材料可分为磁损耗型和介电损耗型两类，根据使用温度范围的不同通常分为常温隐身涂层和耐温（中/高温）隐身涂层，耐温隐身涂层由于使用环境苛刻，存在内应力大、附着力不理想、抗热冲击性能差、施工维护困难、增加飞行器自重、高温寿命短等问题，一直是制约武器装备隐身技术发展的技术瓶颈。结构型隐身材料是在先进复合材料的基础上，将吸收剂分散在特种纤维增强的结构材料中而形成的复合材料，主要用于武器装备中需要结构承力和隐身功能一体化的关键部位，如机翼前缘、机身边缘等，与吸波涂层相比，结构吸波材料集吸波、承载于一体，不仅可以减轻飞行器自重，而且允许设计厚度较大，具有更好的吸波性能以及更高的可靠性，应用前景十分广阔。

电磁超材料是目前隐身材料发展的最新方向。超材料是一类具有自然界材料所不具备的超常物理性质的等效均匀人工复合结构和复合材料，超材料在军工领域的成熟应用主要集中在吸波性能、隐身性能及天线通信性能方面。频率选择表面（FSS）也被认为是电磁超材料的一种，主要应用于雷达罩中。针对传统翼面隐身结构所需结构空间较大的问题，通过加入左手材料可减小隐身结构中尖劈所占体积。

风险提示：我国隐身装备发展速度不及预期；隐身技术更迭较快导致企业技术落后；隐身技术扩散导致竞争加剧。

目录

1	发展隐身技术已成为各国武器装备发展的迫切需要	4
2	隐身技术种类繁多，材料隐身大有可为	4
2.1	雷达隐身：隐身领域最主要的需求	5
2.1.1	典型雷达散射源	5
2.1.2	雷达隐身技术：外形隐身与材料隐身为主	6
2.2	红外隐身：第二大隐身需求	8
2.3	多频谱隐身	8
2.4	典型飞行器部分部位雷达隐身措施	9
2.4.1	进气道	9
2.4.2	座舱	9
2.4.3	雷达天线舱	10
2.4.4	其他射频天线	11
2.4.5	发动机尾喷管	12
2.4.6	机翼前后缘	12
3	隐身材料是提高装备隐身性能的重要途径	13
3.1	涂覆型隐身材料	14
3.1.1	隐身涂层的成分	14
3.1.2	隐身涂层的制备工艺	16
3.1.3	隐身涂层的维护	17
3.1.4	隐身涂层的发展趋势	18
3.2	结构型隐身材料	18
3.2.1	结构隐身材料的成分	19
3.2.2	结构隐身材料的制备	19
3.2.3	结构隐身材料的应用	20
3.3	电磁超材料	20
3.3.1	超材料隐身的原理	20
3.3.2	基于左手材料的翼面隐身结构	22
3.3.3	频率选择表面在雷达罩上的应用	22
4	风险提示	23

图表目录

图表 1:	隐身飞机作战成本对比	4
图表 2:	主要隐身类型及其实现路径	5
图表 3:	各种隐身飞行器的雷达散射截面 (RCS) 估值	5
图表 4:	战斗机外形散射源	6
图表 5:	典型三代机的外形散射源	6
图表 6:	隐身装备外形	7
图表 7:	B-2 飞机吸波材料应用情况	7
图表 8:	飞机红外辐射源分布	8
图表 9:	不同形式的进气道	9
图表 10:	F-35 的整体式座舱	10
图表 11:	一般战斗机雷达天线舱隐身措施	11
图表 12:	表面共形天线	12
图表 13:	飞行器前缘阻抗渐变吸波结构	13
图表 14:	电磁波投射到吸波材料的过程	13
图表 15:	常见吸波材料	15
图表 16:	SiCf/SiC 复合材料高温反射率测试照片	15
图表 17:	雷达红外兼容隐身材料	16
图表 18:	隐身涂层的制备	16
图表 19:	吸波材料的失效形式	17
图表 20:	吸波材料失效状态	17
图表 21:	F-22 隐身涂料日常维护	18
图表 22:	结构型吸波材料产品	19
图表 23:	结构型吸波材料的制备	20
图表 24:	超材料功能原理	21
图表 25:	磁导率和介电常数的不同组合形成的特殊性能材料	21
图表 26:	夹芯型 LHM 翼面隐身结构	22
图表 27:	频率选择表面天线罩常用单元形状	22
图表 28:	频率选择表面天线罩工作原理	23

1 发展隐身技术已成为各国武器装备发展的迫切需要

21 世纪后,隐身技术的发展加剧了各国武器装备竞争,发展隐身技术,提高武器系统生存、空防和纵深打击能力,已经成为集陆、海、空、天、电磁五位一体的立体化现代战争的迫切需要。随着隐身技术的迅速发展和广泛应用,隐身武器在现代战争中所展现的巨大军事效益引起了世界各国的高度关注。

实践证明,隐身技术能有效提高武器装备的作战性能和电子战能力。**武器装备的作战性能主要包括突防能力、生存能力和精确打击能力,隐身武器在这三方面具备显著优势。**突防能力上,隐身武器通过控制或减弱目标特征信号使敌方雷达探测距离成倍降低,借此穿越敌方雷达网对地面目标实施打击,达到出其不意、攻其不备的效果。同时,武器自身的生存能力和杀伤效果也会大幅提高,如隐身导弹可以使敌方的预警雷达网失效,在损失最小的情况下,实现更大范围的突防,大大提高命中率和精确打击能力。

隐身技术的应用不仅大大提高了武器装备的作战性能,还形成了不可估量的军事和经济效益。隐身武器的应用彻底打破了敌对双方原有的进攻和防御平衡态势:一方面,隐身技术的使用降低了己方武器装备投入,优化了资源配置,如下表所示,在执行同等任务时,隐身飞机的军事、经济优势远非普通作战飞机可比;另一方面,隐身武器增加了敌方防御投入,实现了战略威慑。新型的隐身武器势必引起敌方的战略恐慌,如果敌方要实现对隐身的有效防御,必须重新布置原有的防御体系或更新武器装备,其投入费用将大大增长。据统计,反隐身的成本是隐身技术本身成本的 10 倍以上。

图表1: 隐身飞机作战成本对比

隐身飞机作战成本对比		
任务	采用机型	数量
远程轰炸任务	B-2	2 架
	F-117	8 架 F-117、2 架空中加油机,需空勤人员 16 名
	能精确投放但无隐身能力的飞机	16 架投弹飞机、16 架护航战斗机、12 架防空压制飞机、11 架空中加油机,需空勤人员 116 名
	不能精确投弹无隐身能力的飞机	32 架投弹飞机、16 架护航战斗机、12 架防空压制飞机、15 架空中加油机,需空勤人员 132 名

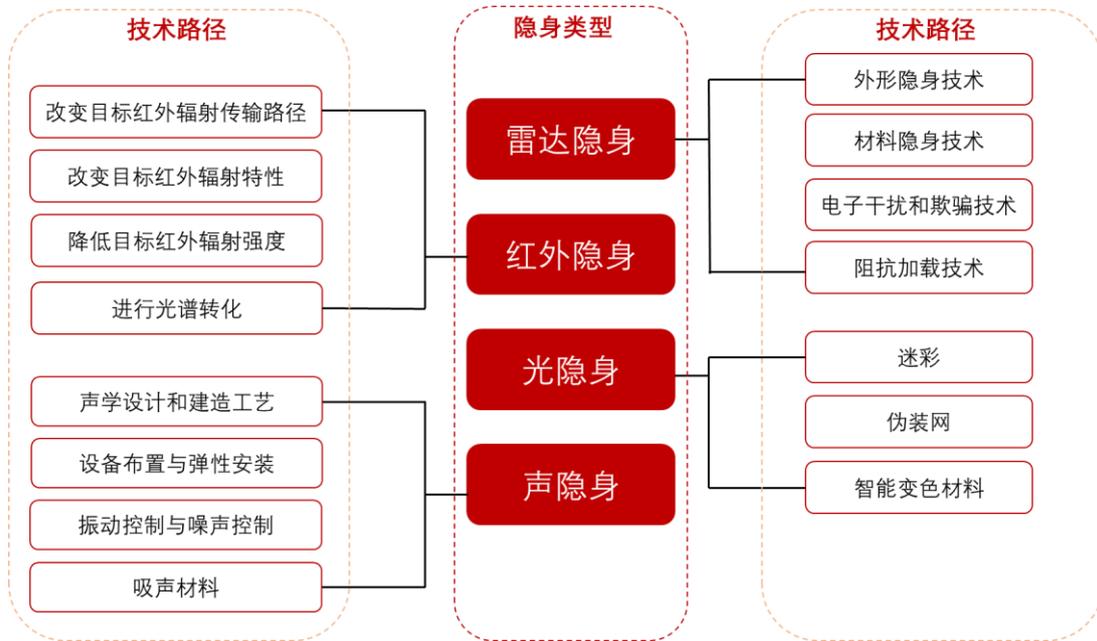
资料来源:《雷达隐身技术分析及进展》,方正证券研究所

2 隐身技术种类繁多,材料隐身大有可为

隐身技术发展的种类繁多,主要目的是**减弱或控制军事目标的特征信号**。隐身技术按应对的探测手段可分为可见光隐身、雷达隐身、红外隐身、激光隐身、声隐身等,分别减弱或控制军事目标的光、电、声等探测特征信号,使其难以被探测、识别、跟踪和攻击而达到隐身目

的。可见光隐身材料已经发展成熟，主要应用为迷彩服等伪装材料，雷达、红外作为最多被使用的探测手段，其对应的各类隐身技术成为了发展的重点。

图表2： 主要隐身类型及其实现路径



资料来源：方正证券研究所

2.1 雷达隐身：隐身领域最主要的需求

雷达隐身技术是应用最早的隐身技术。当雷达系统向某一特定空间发射雷达电磁波，目标通过该区域时，部分的电磁波会被目标物体表面反射回接收天线。当物体表面依原路径返回的电磁波越少，雷达散射截面 RCS 越小，雷达对目标的信号特征就越小，当目标反射的雷达波弱到无法被雷达系统捕捉到，就实现了雷达隐身。根据雷达作用距离方程：

$$R_{max}^4 = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T B F L \left(\frac{S}{N}\right)}$$

式中： σ 为飞机雷达散射面积（RCS），雷达作用距离与 RCS 的四次方根成正比，典型隐身飞行器的 RCS 如下表所示。

图表3： 各种隐身飞行器的雷达散射截面（RCS）估值

机种	B-52	歼八	歼七	B-2	F-22	F-117
σ/m^2	300	10	7	0.1	0.05	0.025

资料来源：《隐身与反隐身技术的发展研究》，方正证券研究所

2.1.1 典型雷达散射源

以战斗机为例，其典型的雷达散射源包括：1) 进气道中的发动机压气机及其所形成的空腔；2) 雷达天线和天线舱；3) 座舱及其中的飞

行员和设备；4) 外挂物及其悬挂装置；5) 机翼、水平尾翼的前后缘；6) 垂直尾翼、机身侧壁；7) 各种缝隙和边缘；8) 发动机尾喷管中的涡轮及其所形成的空腔等。

图表4： 战斗机外形散射源



资料来源：《飞行器隐身技术》，方正证券研究所

对于典型的非隐身飞行器这样的复杂目标，其外形散射特征包括数个较强散射源，如：座舱/机身/弹体/垂尾的镜面散射、进气道/喷口的腔体散射、翼面前后缘的边缘绕射、垂尾和平尾形成的二面角反射等；次弱的散射源有机头的尖顶绕射、外露天线等机表成品的尖点绕射。

图表5： 典型三代机的外形散射源



资料来源：《飞行器隐身技术》，方正证券研究所

2.1.2 雷达隐身技术：外形隐身与材料隐身为主

提高武器装备的隐身性能从而降低发现概率是提高战场生存能力和作战效能非常有效的方法，也是世界各国都在极力发展的技术。实现雷达隐身技术的手段主要有四种，分别是外形隐身技术、材料隐身技术、电子干扰和欺骗技术以及阻抗加载技术。在武器装备外形已经确定并且其自身隐身性能达到一定的高度时，其隐身性能主要取决于隐身材料。

外形隐身技术：外形设计是实现武器装备隐身的最直接、最有效的方法。外形隐身技术通过改变目标的外形设计，在一定角度内增强目标的反射或折射效应，减小 RCS。常见的强反射源有飞机边缘、尖端，机体上的凸出物、外挂物；导弹的头部、尾部和翼面不连接处；舰艇的船体和甲板边缘等。美国 AGM-129 隐身巡航导弹通过采用特殊隐身外形和隐身结构消除了强反射源，减弱了雷达波的散射强度。由于

目标受到空气动力等因素限制，外形设计也只能实现装备一定程度上的隐身，材料隐身技术能有效弥补其不足。

图表6： 隐身装备外形



AGM-129 隐身巡航导弹

F-117 隐身战机

资料来源：美国空军官网，方正证券研究所

材料隐身技术：隐身材料可使武器装备如飞行器在不改变外形结构、气动特性的情形下直接应用，大大降低了其信号特征，提高其生存能力，是提升武器装备隐身能力的重要技术途径。

隐身材料在国外隐身飞机上已有大量应用。据报道，F-117A 隐身战机大量使用了多面体外形设计和雷达吸波材料等隐身手段，其 RCS 比常规战机减少了 23dB，使常规雷达作用距离缩减 73%。B-2 飞机在前后缘（包括升降副翼、方向舵和翼尖）采用了结构型吸波材料，机体表面则采用吸波涂层。在外形隐身技术基本达到极限的情况下，材料隐身技术是未来隐身技术突破重点。

图表7： B-2 飞机吸波材料应用情况



资料来源：《飞行器隐身技术》，方正证券研究所

电子干扰和欺骗技术：电子干扰技术实质是产生与目标或敌方雷达相似的特征信号，使其无法做出正确判断而实现目标隐身。常见的技术手段有：向空中投放箔条等干扰物形成干扰层以遮盖真实目标；利用电子干扰设备发射噪声或类似噪声的干扰信号，使敌方雷达无法检测目标信息；由侦察设备侦测出敌方雷达频率，并以该频率发射回波脉冲，使敌方雷达无法做出正确判决；采用假目标或雷达诱饵技术，发送虚假信号误导敌方等。

阻抗加载技术：阻抗加载主要指有源阻抗加载，是在飞行器上安装转

发器等信号处理元件，使其可发射与入射雷达波幅度相近而相位相反的电磁波，减弱敌方雷达接收到的目标真实回波，达到隐身的效果。美国 20 世纪 90 年代就开始秘密研究有源对消隐身技术，有报道称其 B-2 隐身轰炸机上的 ZSR-63 防御电子设备就是一种有源对消系统。

2.2 红外隐身：第二大隐身需求

处于任意温度下的物体均会向外辐射电磁波，波长处于 0.78~1000 μm 波段的电磁波称为红外辐射。红外隐身技术是通过降低或改变目标的辐射强度来降低目标的可监测性。现代战争中，随着飞行器性能的进一步提升，典型部件温度升高导致红外信号显著增强，同时，红外探测器件性能的提升加剧了飞行器被发现、跟踪和识别的风险。1967 年至 1993 年间，被击落的飞机和直升机中 89% 是由红外制导武器的攻击击落的。飞行器的红外辐射来源复杂，下图所示为喷气式飞机主要的红外辐射源分布，包括工作时发动机（含被加热的尾喷管等）产生的热辐射、发动机排出的高温尾焰辐射、气动加热使蒙皮升温产生的辐射以及对环境辐射的反射等。

图表8： 飞机红外辐射源分布

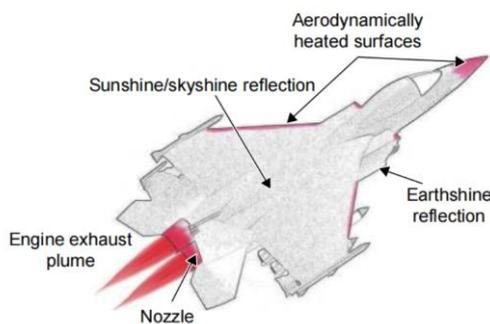


图 1 飞机红外辐射源分布^[1]

资料来源：《红外探测与红外隐身材料研究进展》，方正证券研究所

红外探测系统依靠目标和背景本身温度所引起的热辐射差别来发现和识别目标，要实现红外隐身可通过两种途径：一种是改变物体的红外辐射特性，即控制物体表面的发射率；另一种是改变物体的红外辐射强度，即控制物体表面的温度，缩小目标与背景的温差，从而降低目标和背景的辐射对比度，减小目标的被探测概率。

涂敷低发射率材料可在不改变整体设计的前提下，直接改变物体的辐射特性，因此现有红外隐身材料多集中于低发射率涂层的研制。传统的低红外发射率材料包括金属材料、半导体材料和低发射率填料。金属材料的红外发射率虽然很低，但是受表层形貌的影响较大，并且其兼容隐身性能较差，所以半导体材料成为近年来研究的热点。

2.3 多频谱隐身

单一频段隐身材料在战场上应用受限。随着探测技术的迅猛发展，武器装备在战场上可能同时受到来自雷达、热红外、可见光及近红外、激光等多频谱、多波段侦察仪器的探测，多频谱兼容隐身材料更希望能满足武器装备在战场复杂电磁环境中的需要。

各频谱隐身机理不同，实现多频谱兼容技术难度较大。雷达隐身、红外隐身、可见光隐身、激光隐身等各类隐身材料彼此之间可能存在相互促进或者相互抑制的作用，因此，研究隐身涂层材料体系及兼容设计方案时需要结合材料特性和电磁设计原理。

目前国内外研究较多的多频谱隐身材料主要有：雷达与红外兼容隐身材料、红外与激光兼容隐身材料、红外与可见光兼容隐身材料，以及覆盖包括可见光、近红外、远红外和微波在内的多波段隐身材料。

多频谱未来发展主要包括两个方向：一是在单一隐身功能基础上向更宽频段扩展，比如红外隐身兼顾中红外和远红外波段，雷达隐身在实现重点探测频段隐身的同时向更低频点隐身扩展；二是多种隐身功能的兼容，比如雷达/红外兼容、雷达/红外/可见光兼容等。后者研制难度更大，也是未来隐身材料重要发展方向。

2.4 典型飞行器部分部位雷达隐身措施

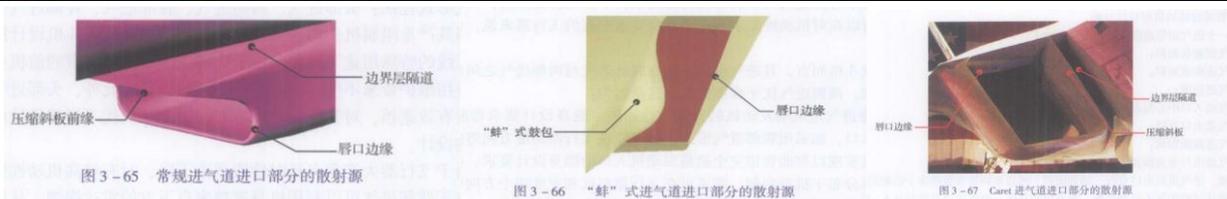
2.4.1 进气道

大量数据表明，进气道是作战飞行器在前向区域影响最广、散射最强的散射源，一般单发飞行器进气道可占整机前向区域雷达散射的40%左右，而双发飞行器其比例可达60%甚至更高。

进气道 RCS 缩减技术：

- 1、进气道布局形式选择：仅从雷达隐身角度考虑，背部进气、两侧进气要好于头部进气和腹部进气。
- 2、将进气管道弯曲设计，使之在关注视角内遮挡发动机入口；在进气道内壁涂覆吸波材料，或将内壁设计为整体吸波壁板，如 F-35 飞机采用三维复合材料编制技术研制的具有吸波功能的整体式进气管道；控制唇缘方向，优化选择唇缘的截面形状，如有必要，可为唇口部分设计专门的雷达吸波结构或采用雷达吸波涂层；采用无隔道超声速进气道（DSI）设计，即所谓的“蚌”式进气道。

图表9：不同形式的进气道



资料来源：《飞行器隐身技术》，方正证券研究所

2.4.2 座舱

座舱是有人驾驶飞行器不可缺少的重要部件，研究表明，它对整机 RCS 的贡献达到 10%-20%。座舱的散射场表现为座舱内部布置复杂的仪表板、操控台、座椅等引起的后向散射场（占座舱 RCS 的 90%）和座舱结构连接骨架形成的缝隙和台阶、座舱结构连接件等形成的相对较弱的散射。

座舱 RCS 缩减技术：

1、座舱腔体屏蔽技术，即透明件镀膜技术，在座舱透明件表面镀制一层透明导电膜，在满足透光率等光学性能的前提下，实现对座舱腔体的电磁屏蔽，Au膜是第一代座舱镀膜，常见于早期的飞机，包括F-117A和F-16，而目前隐身飞行器一般采用氧化铟锡（ITO）膜。

2、座舱次强散射源散射主要包括座舱透明件结构连接件产生的棱边散射，如风挡与舱盖之间的弧框。典型传统飞行器风挡与舱盖之间的弧框的前向RCS约为0.05 m²左右，因此对于隐身飞行器座舱设计而言，首先必须从电磁的角度消除这一弧框。F-22飞机风挡和舱盖的透明件为一整体，彻底取消了这一弧框，但显然付出了较大的重量代价（F-22飞机的一体化座舱盖重量约为170kg左右，而典型传统飞行器风挡加舱盖重量约为120kg）。而F-35看似保留了弧框，但仍保证了整个透明件外表面连续且外表面镀膜，从而在隐身角度实现了弧框的屏蔽。

图表10： F-35的整体式座舱



资料来源：《飞行器隐身技术》，方正证券研究所

2.4.3 雷达天线舱

雷达截面控制的重点方位是机头方向，而雷达天线舱是飞行器机头方向的三大强散射源之一，对整机雷达截面的减缩起着重要作用。

雷达天线舱的散射场体现在电磁波通过雷达罩进入雷达天线舱内后，经内部天线结构、安装框板、结构附件、罩上附件和连接件等引起的后向散射场以及相互之间的多次反射（称为结构项反射，占雷达天线舱RCS的90%以上）和电磁波进入雷达天线舱后，由于阻抗失配引起的二次反射（模式项反射）。

雷达天线舱 RCS 缩减技术：

1、结构隐身设计：首先，应对雷达天线安装的飞行器I框进行向上的倾斜，角度在15°~30°之间，这样可以使从雷达天线和安装框板反射的最强电磁波向上偏离，偏离出机头前向的主要敏感角度区域。另外，采用高性能的吸波材料对在雷达罩内影响隐身性能的电磁波进行吸收，达到阻断电磁波经过多次反射导致后向散射过大的问题，从而达到电磁隐身的目的。

2、吸波部件设计：性能优良的吸波部件能极大改善雷达天线舱的结构项散射。根据雷达天线和安装框板的外形空间，使用高性能吸波材料，有针对性地设计吸波部件外形、对雷达天线安装框板、雷达天线外部结构（相扫天线）以及结构附件等进行遮挡和吸波处理，以

达到对雷达天线舱内部结构的隐身。

3、天线隐身设计：针对有源相控阵雷达天线，雷达天线的外形应尽量与飞行器机头的安装框外形平行一致。雷达天线的辐射阵子采用散射小的端射阵子形式。对雷达天线的反射阵面应采用高效的吸波材料进行处理；雷达阵子天线与后端传输线之间采用高性能的环形器进行隔离，可以大大减少模式项的反射。雷达阵子的排列和间隔需要考虑栅瓣的产生，尽量使栅瓣位置偏离到非敏感的角度区域之外。此外，对雷达天线辐射阵子的加工工艺需要进行严格控制保证阵子之间高精度加工的一致性。

4、雷达罩隐身设计：雷达罩的隐身设计主要是针对 FSS 带通雷达罩。FSS 雷达罩的关键技术之一是表面周期结构的设计和布局。选用正确的匹配性好的 FSS 阵子，实现雷达罩的带通设计。当 FSS 选择好后，需要在介质结构上排列周期性的金属 FSS 阵子，使雷达频段的电磁波能够通过 FSS 雷达罩出去，而带外的电磁波不能通过，其大部分能量经过低 RCS 雷达罩的外形而散射到非威胁区域。

图表 11： 一般战斗机雷达天线舱隐身措施

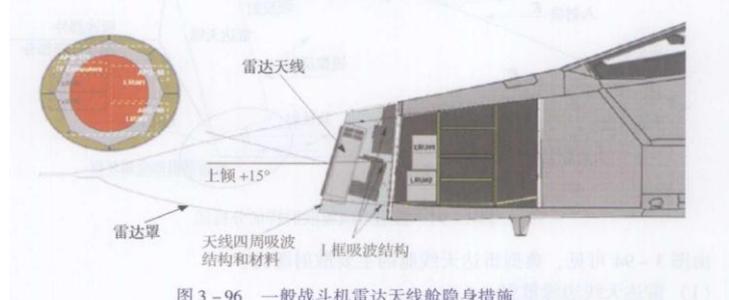


图 3-96 一般战斗机雷达天线舱隐身措施

资料来源：《飞行器隐身技术》，方正证券研究所

2.4.4 其他射频天线

在一个低 RCS 飞行器外形平台上叠加传统飞行器部分凸出外形的天线后，会使前向扇区 RCS 增加达 10dB 左右。对于传统飞行器或传统飞行器隐身改装而言，凸出外形天线的 RCS 对整机 RCS 的贡献是小量，但对于隐身飞行器而言是不可接受的。因此，对于低 RCS 飞行器，其天线安装形式一般主要有两种：一是共形安装，这类天线主要是 CNI 的天线；二是如雷达天线一样，将天线内置，在天线孔径口面处设置透波天线罩，如电子战天线等。但无论是哪一种安装形式，对天线而言都必须采取隐身设计。

射频天线通用 RCS 缩减技术：

1、孔径综合：孔径综合的目的是尽量控制全机天线孔径的总体数量。根据天线的频段划分、功能要求等对其进行分类并且同一频段若干天线，尽管功能不同，尽量采用一个天线孔径。

2、低 RCS 天线布局设计：在总体布置上尽量利用遮挡关系，消除或抑制天线在功能上不需要的方向上散射。此外，天线安装边须按“锯齿平行”设计原则设计，即将安装边的散射控制在规定的非主要威胁方位，一般是在俯视投影面上，前后端安装边平行于机翼前缘。

3、低 RCS 天线设计：对孔径综合后的天线进行低 RCS 设计，在满足

其天线性能要求的前提下，抑制天线自身的结构项散射和模式项散射。

4、表面共形天线设计：在天线性能可接受的前提下，尽量采用表面共形天线设计，否则采用内置安装。若对于窄频带天线，其天线罩应采用 FSS 技术，以解决带外隐身问题。

图表12： 表面共形天线

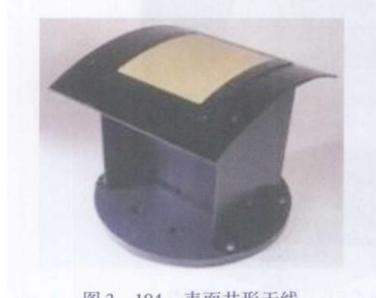


图 3-104 表面共形天线

资料来源：《飞行器隐身技术》，方正证券研究所

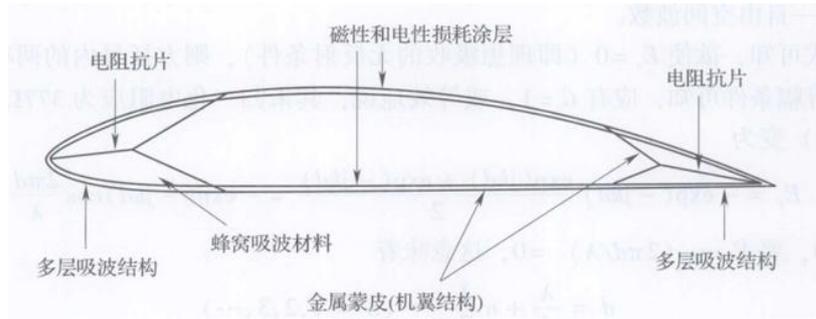
2.4.5 发动机尾喷管

排气系统作为飞行器后向最重要的雷达散射源和红外辐射源，对实现飞行器全方位雷达和红外隐身具有重大影响。与进气系统类似，排气系统的尾喷管腔体散射也在腔体散射中占主导地位，而且这种腔体散射是不能完全靠外形设计来消除的。改变其特征的手段只有采用吸收电磁波的方式。在发动机尾喷管方面，除常规的轴对称喷管外，还有缝隙式喷管、二维矢量喷管以及背负式喷管，在进行隐身飞行器尾喷管设计时，应尽量避免形成一次镜面散射，要尽可能的形成多次散射，通过应用吸波材料来提高隐身效率。

2.4.6 机翼前后缘

在飞行器结构中，机翼或弹翼的前后缘是飞行器的强散射点之一，需要对其进行隐身处理。目前，对机翼前缘的隐身处理主要有两种手段。一种是对机翼的外部及内部使用涂覆型或结构型吸波材料。F-22 对翼面结构的前后缘等结构采用先进的宽频、高性能吸波结构复合材料，对其进行雷达散射截面（RCS）减缩。另一种为将整个机翼设计为隐身结构，即在保持原有气动外形的条件下，将吸波材料同机翼中承力结构结合在一起。它是一种既能满足外形气动和结构要求，又能有效减少电磁波反射的多功能一体化结构。如 B-2 隐身轰炸机机翼蒙皮最外层涂覆磁损耗吸波涂层，蒙皮采用一种六角形蜂窝夹芯碳/环氧吸波结构材料，前后缘采用蜂窝夹芯结构，蜂窝网格内填充有磁损耗和电损耗吸波物质，夹芯上下为吸波波纹板。

图表13: 飞行器前缘阻抗渐变吸波结构



资料来源:《飞行器隐身技术》, 方正证券研究所

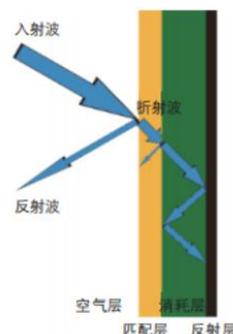
3 隐身材料是提高装备隐身性能的重要途径

隐身材料是指应用在武器装备上使其具备隐身功能的材料,可以降低装备的雷达和红外目标特性,减少武器装备被雷达、红外等探测装备发现的概率。隐身材料按成型工艺和承载能力可分为涂覆型和结构型两类:涂覆型涂于目标表面形成吸波涂层,结构型是参与结构承力的、有吸波能力的复合材料。

涂覆型隐身材料又叫隐身涂层,一般由功能填料和粘结剂组成。功能填料是保证涂层达到隐身性能的重要组成,选用不同的功能填料可以达到不同的隐身效果,比如雷达隐身涂层通常选用能够损耗雷达波的吸收剂作为功能填料,而红外隐身涂层则主要选择低发射率材料作为功能填料制备低发射率涂层,或者是选用相变控温填料来制备控温红外隐身涂层。要达到多频谱兼容隐身效果,则需要选择兼容对应频段隐身性能的功能填料。粘结剂是涂层的基体材料,其作用是使涂层与基材达到良好的结合力,较为常用的是树脂基粘结剂。

雷达隐身材料的机理建立在电磁波传播理论上,投射在材料表面的电磁波将会产生反射和折射现象。当入射电磁波辐射到材料表面时,一部分电磁波会进入到材料内部,另一部分电磁波在材料界面发生反射现象,使得部分电磁波再次回到自己空间。而进入材料内部的电磁波一部分会被材料吸收、损耗转化成其他能量,一部分则透射过材料,进入自由空间。

图表14: 电磁波投射到吸波材料的过程



资料来源:《吸波材料的最新研究现状及发展趋势》, 方正证券研究所

结构型隐身材料通常是将吸收剂分散在由特种纤维增强的复合结构材料中,优点是具有良好的可设计性,有助于拓宽吸波频带,质量较轻,强度高,韧性好,具有承载和雷达吸波双重功能等;缺点是制备

工艺复杂，成本较高。目前国内外研究最多的是结构雷达隐身材料，其可以与红外隐身涂层结合使用，从而达到红外/雷达兼容隐身效果。随着先进复合材料在飞行器上不断的应用，采用结构型吸波复合材料也是新一代军用飞行器材料研究的主要方向。

3.1 涂覆型隐身材料

3.1.1 隐身涂层的成分

雷达隐身涂层是具有电磁波吸收功能的涂料，这类材料一般是由吸收剂和基体材料两部分组成。常用的吸收剂在自然状态下是粉体，经过和基体的加工作为涂层涂覆在受保护对象上，制备工艺简单，易操作，成本低，适用于复杂外形，目前几乎所有的隐身武器都使用了涂覆型吸波材料。

按照材料的电磁损耗机理的不同，雷达吸波材料可分为磁损耗型和介电损耗型两类。

磁损耗型吸波材料是通过控制添加的**磁性吸收剂**来获得较高的吸波性能，这类材料一般使用**金属铁微粉、铁氧化物、羟基铁、铁丝纤维**等具有磁性的材料作为吸收剂，主要通过磁极化作用衰减吸收电磁波，一般磁损耗型吸波材料的吸波频带相对于介电损耗型吸波材料较宽，并且吸波效果较好，但缺点是密度较大，质量较大，高温性能差。

介电损耗型吸波材料是以各种**介电损耗吸收剂**为主体，通过调节吸收剂含量、成分以及填充剂种类而制备得的一类吸波材料，通常采用**石墨粉、碳纳米管、碳纤维、钛酸钙、钛酸镁、钛酸钡、尖晶石、氧化锌、导电高聚物**等电介质材料作为吸收剂。对于介电损耗，一般被认为是由介质的电导率所产生的漏电电流所引起的损耗。通常介电损耗型吸波材料的吸波频带较窄，但是对高频率的雷达波吸收效果较好，密度小，质量小。

耐温隐身涂层：武器装备需要隐身的部位按照工作温度来划分，可以分为常温和高温两类，高温部位例如战斗机、巡航导弹等空中武器装备的尾喷管、鼻锥帽、机翼前沿等部件工作温度可达到 700℃甚至 1000℃以上，对雷达波反射较强，是影响新型武器装备隐身性能的重要因素。隐身涂层材料根据使用温度范围的不同通常分为常温隐身涂层和耐温（中/高温）隐身涂层。

耐温隐身涂层由于使用环境苛刻，存在内应力大、附着力不理想、抗热冲击性能差、施工维护困难、增加飞行器自重、高温寿命短等问题，一直是制约武器装备隐身技术发展的技术瓶颈。

图表15: 常见吸波材料

名称	吸收机理	优点	缺点
铁氧体	在低频段,电磁波的损耗主要来源于磁滞效应、涡流效应及磁后效;在高频段,电磁波的损耗则主要来源于自然共振损耗、畴壁共振损耗及介电损耗。	既是磁介质又是电介质,兼具磁吸收与电吸收两种功能,研究成熟,应用广泛,频带较宽	质量大,高温特性差
超细金属粉(包括金属铁粉、铁合金粉、羰基铁粉等)	通过磁滞损耗、涡流损耗等吸收衰减的电磁波。	粒径小,具有较高的微波磁导率,较好的温度稳定性,吸波性能良好	抗氧化、抗酸碱能力差,介电常数较高,价格高
碳类(石墨、乙炔、碳纳米管、碳纤维等)	通过介电损耗吸收电磁波	密度低,质量轻,电导率高,容易调节涂层的吸波性能	高温抗氧化能力差
陶瓷材料(氧化锌、钛硅碳、氧化铝,钙钛矿等或纤维增强复合材料)	一般是通过材料的介电损耗(加入磁性物质时具有磁损耗)吸收电磁波。	耐高温、蠕变低、强度高、耐腐蚀性强和化学稳定性好,膨胀系数小、同时兼具吸波功能	带宽窄,厚度大,介电常数随烧结温度的变化较大
导电聚合物	导电损耗、介电损耗,处于半导体状态时,吸波性能最佳。	结构多样,密度低,热稳定性好,频带宽,涂层非常薄	不溶不熔。

资料来源:《周期结构与陶瓷涂层复合的吸波材料设计及其性能研究》,方正证券研究所

因为绝大部分磁性吸收剂居里温度较低,在高温下会失去磁性,从而失去吸波性能,因此磁性吸波材料一般只能用于武器常温部位的隐身。武器高温部位的隐身必须采用**电损耗型吸波材料**,一般为陶瓷吸波材料,其吸收剂为陶瓷吸收剂,研究较多的主要是碳、碳化硅、氧化锌吸收剂,目前主流应用仍为碳吸收剂。**碳材料具有密度低、耐高温、来源广泛等特点,作为高温吸波材料受到广泛关注。**

碳化硅熔点高达 2840℃,氧化后可生成致密氧化硅保护膜,高温稳定性优越,且本身为半导体,介电性能可调。SiCf/SiC 陶瓷基复合材料是指在 SiC 陶瓷基体中引入 SiC 纤维作为增强材料,具有电性能可调、高温抗氧化、断裂韧性高、高强度、低密度等特点,是最有前途的高温结构吸波材料之一。

图表16: SiCf/SiC 复合材料高温反射率测试照片



资料来源:《高温雷达吸波材料研究现状与展望》,方正证券研究所

雷达红外兼容隐身涂层:实现红外和雷达隐身兼容有两种方式,一是研制一种材料,使其具有微波高吸收、热红外低辐射的性能,这种单一型材料主要有导电高聚物、纳米材料和掺杂氧化物半导体等;二是分别研制高性能微波吸收材料和热红外低辐射材料,然后将二者复合实现红外和雷达隐身兼容,如考虑把红外低发射率层作为外层,雷达

波高吸收层作为内层形成一种雷达与红外兼容的双层复合结构。

图表17: 雷达红外兼容隐身材料

雷达红外兼容隐身材料	材料成分	特点
纳米隐身材料	纳米金属与合金吸收剂(如纳米铁、纳米镍、纳米钴及其合金); 纳米氧化物; 纳米 SiC 及纳米铁氧化物、纳米石墨; 纳米 Si/C/N 和纳米 Si/C/N/O; 纳米氮化物和纳米导电聚合物等	厚度薄、质量轻、吸收频带宽、兼容性好等特点
掺杂氧化物半导体	掺锡氧化铟(ITO)、掺铝氧化锌(ZAO)等	制备简单并易于掺杂、成本较低、无毒、热稳定性好等优点,但其性能稳定性稍差,重复性不大理想
导电高聚物	聚乙炔、聚吡咯、聚苯胺和聚噻吩	密度小、可分子设计、结构多样化、电磁参量可调、易复合加工以及独特的物理、化学特性等

资料来源:《红外/雷达兼容隐身材料的研究进展》,方正证券研究所

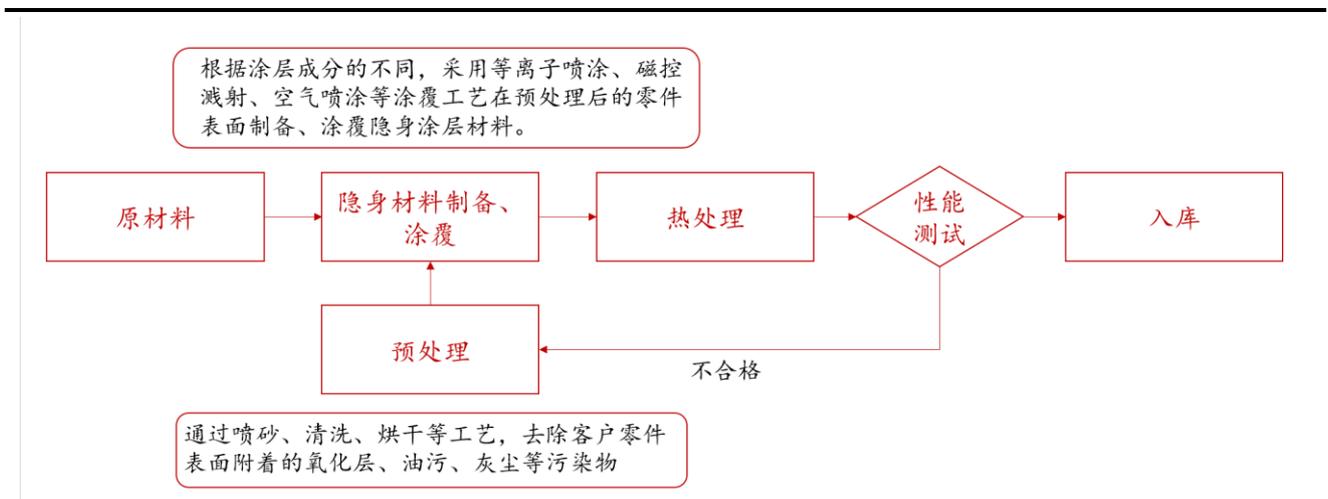
3.1.2 隐身涂层的制备工艺

隐身涂层制备过程主要包括零部件预处理,隐身材料制备、涂覆、热处理以及性能测试,需要运用定制化开发的生产设备及特定的生产工艺将材料直接制备并涂覆在客户零部件表面。

近年来,制备隐身涂层材料的主要工艺包括物理涂覆、化学镀、物理气相沉积、热喷涂和溶胶-凝胶技术等。

物理气相沉积技术是指在真空条件下,采用物理方法,将材料源固体或液体表面气化成气态原子、分子或部分电离成离子,并通过低压气体(或等离子体),在基体表面沉积具有某种特殊功能的薄膜的技术,不仅可沉积金属膜、合金膜、还可以沉积化合物、陶瓷、半导体、聚合物膜等。

图表18: 隐身涂层的制备



资料来源:华秦科技招股说明书,方正证券研究所

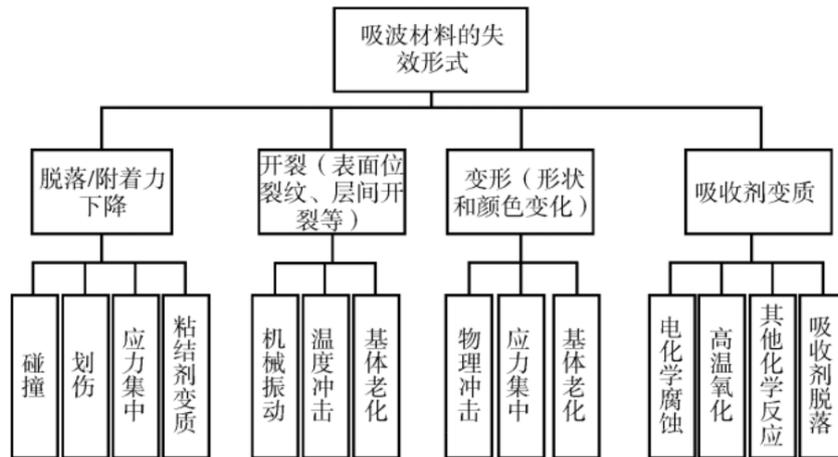
关于生产设备,华秦科技招股说明书提到:对于隐身涂层材料及防护

材料，客户将相关零部件发运至公司后，公司运用定制化开发的生产设备及特定的生产工艺将特种功能材料直接制备并涂覆在客户零部件表面，从而在客户零部件表面形成特种功能材料涂层，提升客户零部件的隐身能力或防护能力，在此过程中即完成了公司产品的生产。公司通过与国内专业的设备生产厂家进行合作，对设备生产厂家提出包括设备尺寸、形状、机械机构运动方式、真空度等方面的定制化需求，设备厂家生产人员与公司技术人员沟通确定设备设计方案后，由设备厂家进行相关设备的生产。公司核心定制化设备的关键器件均可由国内相关厂家生产，不存在依赖进口的风险。

3.1.3 隐身涂层的维护

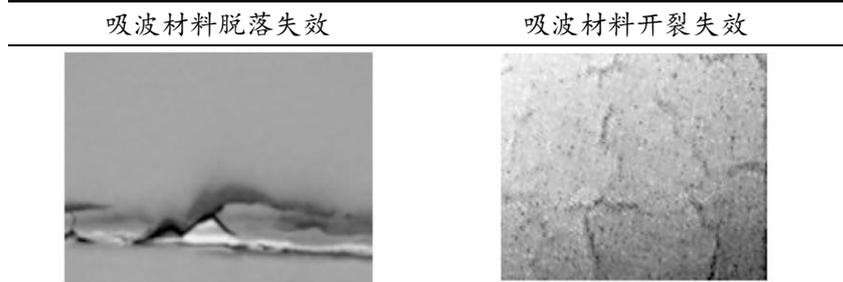
吸波涂层被广泛用于飞机、舰船、导弹及其他武器装备。在武器装备寿命期内的任何隐身涂层在贮存、运输和使用过程中，均会受到环境因素的影响和作用，从而引起涂层变色、粉化、起层、开裂、附着力下降等物理化学性能的变化和涂层隐身性能的波动。同时，在战场上、平时训练等引起的隐身涂层的划伤、擦伤等机械损伤都会严重影响到武器的隐身性能。涂层脱落部分使电磁波反射严重，从而会严重影响到舰艇等武器装备的隐身性能。

图表19： 吸波材料的失效形式



资料来源：《吸波材料的失效行为分析及修复技术研究》，方正证券研究所

图表20： 吸波材料失效状态



资料来源：《吸波材料的失效行为分析及修复技术研究》，方正证券研究所

美国 F-117 战机在初期，差不多 10 次出动中，飞机的隐身系统有 9

次要进行大修。B-2 飞机 900m² 表面的 95% 涂覆一种具有不同厚度的韧性隐身涂层，每次飞行后，都需要对其表面进行掉屑、划伤和腐蚀等检查，且在两次飞行之间必须对损坏的蒙皮进行修理。因此，美军高度重视雷达吸波涂层维修技术的研究，认为该技术对隐身武器装备的作战效能、装备战斗力的形成与提高、甚至战争的胜负具有至关重要的影响。

图表21: F-22 隐身涂料日常维护



资料来源：美国空军官网，方正证券研究所

据佳驰科技招股说明书披露：由于隐身飞机等武器装备的使用环境较为恶劣，在高速飞行后隐身材料容易发生磨损或脱落，任何细小损伤都可能影响整体隐身效果，增大暴露风险，因此隐身武器装备在使用过程中亦需经常性的维护；**目前公司正在开展隐身维护产品的研制，未来将用于隐身装备的维护工作。**

3.1.4 隐身涂层的发展趋势

隐身材料的薄型化和轻量化日渐成为发展趋势。武器装备薄型化和轻量化可以为军事战备的应用带来诸多好处，隐身材料的薄型化和轻量化有助于降低武器装备整体质量，可有效提升飞行器的航程和载荷，对航空装备的意义尤为重大。目前，现有的隐身材料仍然存在厚度大、质量高的问题，薄型化和轻量化是隐身材料的发展趋势。

如何将隐身材料应用于多种武器装备，如何适应各种环境也成为各国研制隐身材料的重点考虑。武器装备所面临的战场环境恶劣，隐身涂层的物理性能极为重要，如早期的 B-2 隐身轰炸机，每次飞行需要数日的涂层维护工作，大大影响了作战效能。在现代战争中，隐身武器装备除了面临探测威胁外，还可能受到腐蚀、雷击、核污染、高温、碰撞等特殊环境，因此对隐身涂层提出了多功能的要求。目前美国和俄罗斯等国家均已开展相关研究，并已陆续应用于弹头等武器装备，多功能是隐身材料的重要发展趋势。

智能材料、纳米材料成为下一代隐身材料方向。尽管传统雷达隐身材料已经取得了长足发展，但是随着反隐身技术的快速发展，传统雷达隐身材料已无法完全满足新一代武器装备的隐身要求。为此，以智能材料、手性材料、纳米材料为代表的新型吸波材料成为了下一代雷达隐身材料的主要发展方向。

3.2 结构型隐身材料

结构型吸波材料是在先进复合材料的基础上，将吸收剂分散在特种纤维增强的结构材料中而形成的复合材料，该类型复合材料通常通过改变纤维的成分、结构、排布方式及层数来达到良好的吸波性能和载荷能力。与吸波涂层相比，结构吸波材料集吸波、承载于一体，不仅可以减轻飞行器自重，而且允许设计厚度较大，具有更好的吸波性能以及更高的可靠性，应用前景十分广阔。结构吸波材料主要用于武器装备中需要结构承力和隐身功能一体化的关键部位，如机翼前缘、机身边缘等。

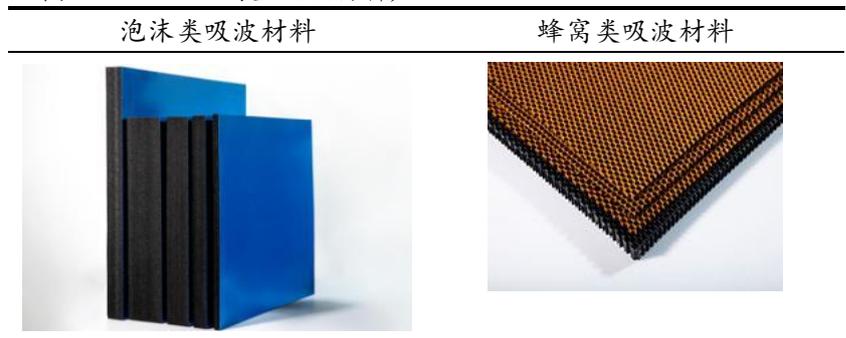
3.2.1 结构隐身材料的成分

根据结构隐身材料的类型不同，可以分为树脂基结构隐身材料和陶瓷基结构隐身材料，其中树脂基结构雷达隐身材料的研究比较成熟，应用较为广泛。树脂基结构雷达隐身材料的制备通常是采用不同种类的纤维来增强热固性树脂基体，采用的纤维通常是碳纤维、石英纤维、碳化硅纤维等。

碳纤维（CFs）具有高强度、高模量、质量轻、耐高温和良好的化学稳定性等优点，是目前最为新型、重要的纤维材料。在电磁材料领域，碳纤维具有优异的介电损耗，但磁损耗能力较弱，需要在CFs的表面引入单层金属或其他氧化物来提高其磁损耗，进而提高其吸波性能。

树脂基结构雷达隐身材料可以分为吸收剂散布型、多层板型和夹层结构等三类结构。吸收剂散布型是由热固性树脂作为基体，吸收剂作为功能填料，纤维作为增强体，常用的吸收剂主要是高电导率的碳纳米吸收剂（炭黑、碳纳米管、石墨烯和碳纳米线等），一方面是由于碳纳米吸收剂具有高电导率、低密度的优点，雷达吸波性能较好；另外一方面是由于纳米吸收剂填充到复合材料中可以起到增强作用，提高复合材料的力学性能。由于单一的吸收剂散布型吸波材料吸收频带较窄，为了有效的拓宽吸收频带，可以设计多层吸波材料。夹层结构吸波材料具有刚度和强度高、重量较轻、导热系数较低等优点，一般由透射层、夹心层和反射层三层组成。

图表22： 结构型吸波材料产品



资料来源：佳驰科技招股说明书，方正证券研究所

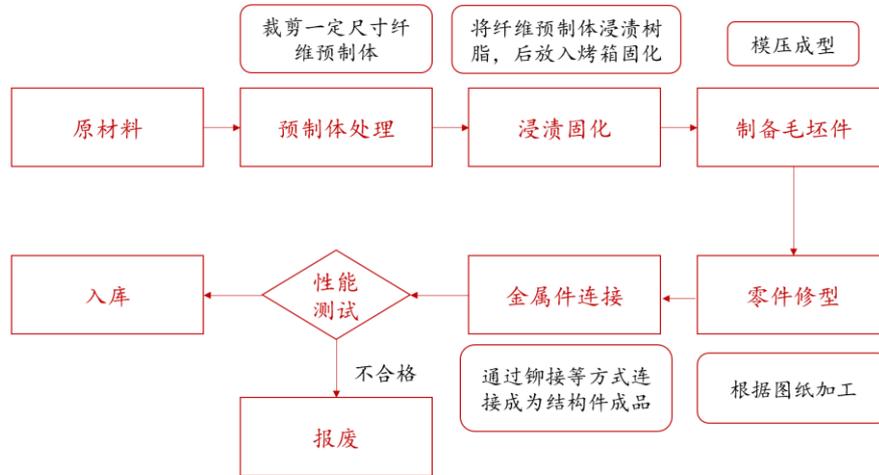
3.2.2 结构隐身材料的制备

华秦科技结构隐身材料的工艺包括预制体处理，浸渍固化，制备毛坯件，零件修型，金属件连接，性能测试等流程，直接进行零部件生产。

佳驰科技的隐身结构件是在先进复合材料的基础上，将吸收剂分散在

特种复合材料中，经严格的电磁结构性能一体化规划设计，采用多轴机加或 3D 打印精密成型制造而成。

图表23: 结构型吸波材料的制备



资料来源：华泰科技招股说明书，方正证券研究所

3.2.3 结构隐身材料的应用

美国将结构隐身材料广泛应用于其武器装备。为满足侦察任务需要，减少飞机的雷达探测性，美国洛克希德公司于 1962 年研制了 A-12 高空高速侦察机，在主要结构（如翼面、机身）的边缘采用雷达吸波结构复合材料（在蒙皮上涂覆铁氧体、羰基铁等雷达吸波材料）。类似的雷达吸波结构大量用于 SR-71、D-21、F-117 等飞机上。

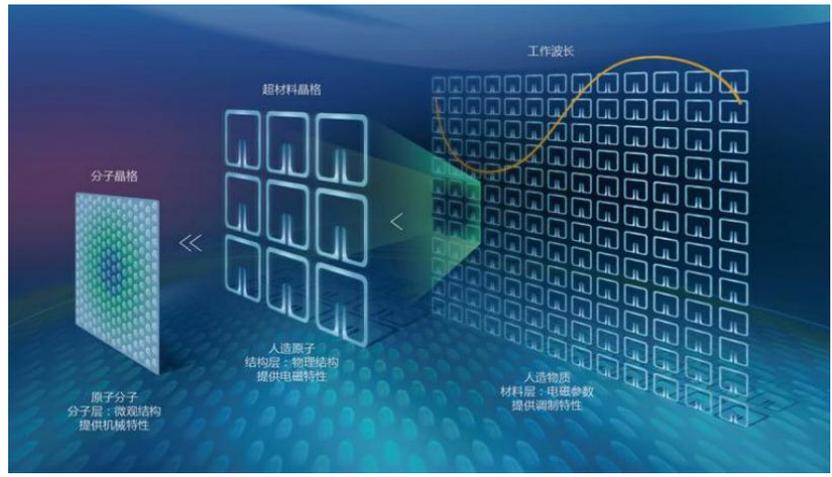
20 世纪 90 年代以来，雷达吸波结构复合材料技术研究取得了丰硕的成果，研制出了多种高性能雷达吸波结构，并成功地应用于第五代军用飞机研制和第四代军用飞机的雷达隐身改造。据了解，F-22 的翼面前后缘包括翼面前缘、副翼、襟翼、安定面、机身边条、进气道等均采用了形式各异的雷达吸波结构复合材料。

3.3 电磁超材料

3.3.1 超材料隐身的原理

电磁超材料是目前隐身材料发展的最新方向。超材料是一类具有自然界材料所不具备的超常物理性质的等效均匀人工复合结构和复合材料。天然材料由原子或分子组成，以介电常数、磁导率来描述其电磁特性；超材料由人工结构的微结构组成，以等效介电常数、等效磁导率描述其整体电磁特征。通过设计不同的微结构，可使超材料的相对等效介电常数、相对等效磁导率为小于 1 的正实数、负实数或复数，从而使电磁波传播方式从根本上发生变化。

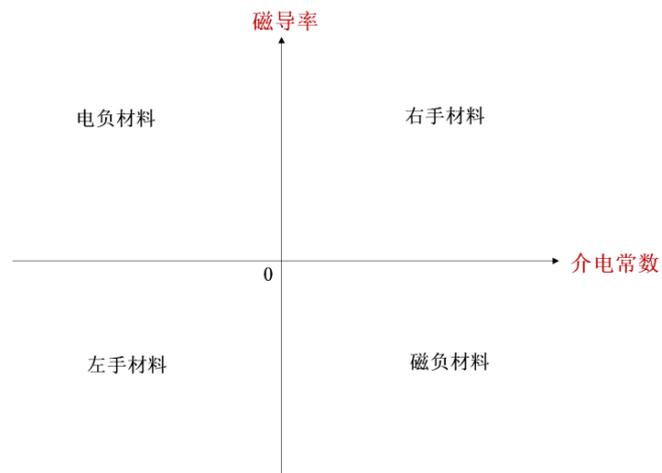
图表24: 超材料功能原理



资料来源: 光启技术公告, 方正证券研究所

通过对磁导率和介电常数进行不同的组合, 可以形成具有不同特殊性能的材料。右手材料指介电常数和磁导率都是正值的媒介, 该媒质中电磁波的电场、磁场和波矢量呈右手螺旋关系, 自然界中大部分媒介属于这一类别。左手材料 (Left-handed Materials, LHM), 指介电常数和磁导率都是负值的媒介, 该媒介中电磁波的电场、磁场和波矢量呈左手螺旋关系, 是最早提出的一种超材料, 具有负折射率、倏逝波放大、逆多普勒效应、逆切仑科夫辐射、亚波长衍射等奇异特性。电负材料及磁负材料, 指介电常数和磁导率二者之一小于零的超常介质, 电负材料的介电常数小于零而磁导率大于零, 磁负材料的介电常数大于零而磁导率小于零。自然界中除了等离子体和铁氧体等具有电负材料和磁负材料特性之外, 其他媒介基本上都属于右手材料。

图表25: 磁导率和介电常数的不同组合形成的特殊性能材料



资料来源: 光启技术公告, 方正证券研究所

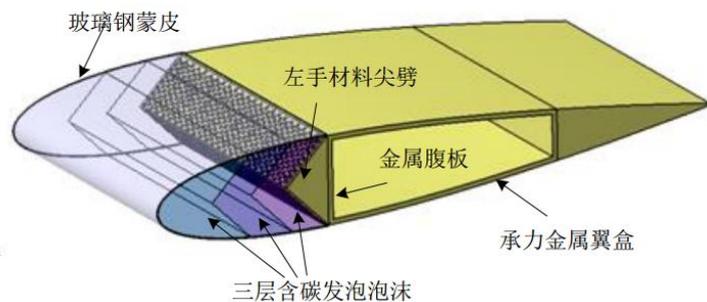
超材料在军工领域的成熟应用主要集中在吸波性能、隐身性能及天线通信性能方面。在吸波体方面, 超材料的负电磁参数构造高阻抗表面, 可以实现薄板电磁波吸波结构, 而且超材料的电磁谐振结构, 既有磁谐振又有电谐振, 两者可以独立设计, 从而实现阻抗匹配。同时, 超材料构成的吸波材料是一种窄带吸波结构, 该结构可以用于解决吸波材料的低频问题, 通过合理设计能够与入射电磁波的电磁分量产生耦合, 从而对入射到吸收器的特定频带内的电磁波实现 100% 的吸收, 具有更好的吸波性能。在隐身设计领域, 利用超材料的“负折射”效应,

可制备出超材料隐身斗篷，通过合理设计，电磁折射率可通过微结构进行人为控制，在不改变现有装备外形特征以及不影响现有装备动力学性能的情况下，使电磁波从任何方向照射目标都完全在覆盖于目标外的超材料中绕射传播，无损耗地沿原方向传播，达到隐身效果。

3.3.2 基于左手材料的翼面隐身结构

文献《基于左手材料的翼面隐身结构设计及优化》针对传统翼面隐身结构所需结构空间较大的问题，通过加入左手材料来减小隐身结构中尖劈所占体积。利用一种左手材料对金属尖劈进行改进，结果表明在相同 RCS 减缩条件下，与原金属尖劈比较，体积可减缩到原有体积的 1/5。基于左手材料的夹芯型翼面隐身结构相较完整翼型翼段和金属腹板翼段，优化后隐身结构在空间上可降低 RCS 10dB 以上。

图表26： 夹芯型 LHM 翼面隐身结构

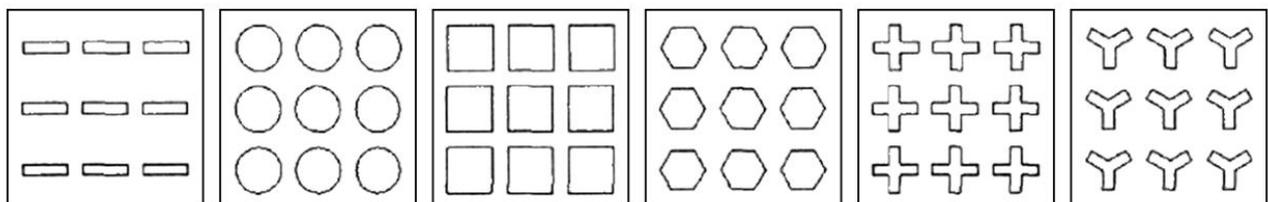


资料来源：《基于左手材料的翼面隐身结构设计及优化》，方正证券

3.3.3 频率选择表面在雷达罩上的应用

在电磁超材料概念提出初期，电磁超材料与频率选择表面在电尺寸上是有很大差别的，一般电磁超材料微结构尺寸是小于 1/10 个波长的，而频率选择表面单元结构会介于 1/10 波长与 1/2 波长之间，随着两项技术相互借鉴融合，其基本单元逐渐处于相同的尺寸范围，因此，后期也把频率选择表面作为电磁超材料的一种。

图表27： 频率选择表面天线罩常用单元形状

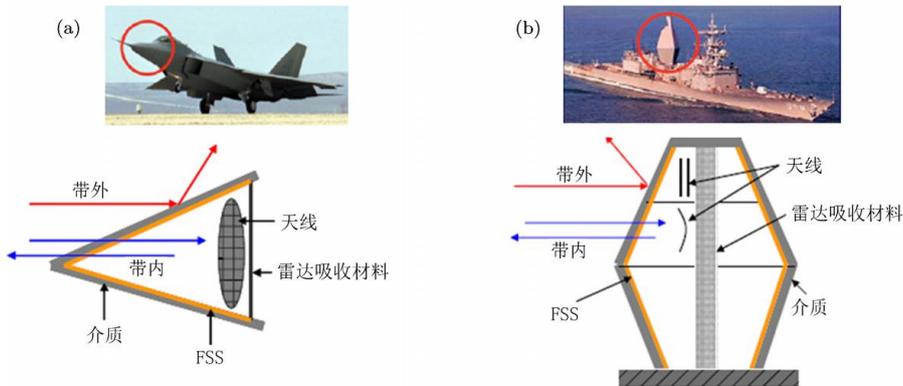


资料来源：《频率选择表面天线罩研究现状与发展趋势》，方正证券研究所

频率选择表面 (FSS) 主要应用于雷达罩中。由雷达天线、天线罩及雷达舱内高频部件组成的雷达天线系统是飞行器头部区域的一个强散射源，其隐身效果直接影响飞行器的隐身效果。天线罩是保护雷达天线系统免受外界环境影响的装置，集透波、承载、耐热于一体。隐身天线罩技术是目前解决雷达天线隐身最有前景的技术之一。隐身天线罩通常采用的技术包括频率选择表面技术、极化选择表面技术、阻

抗加载技术以及时域隐身技术等，而目前国内外运用最广泛的是 FSS 技术。

图表28: 频率选择表面天线罩工作原理



资料来源:《频率选择表面天线罩研究现状与发展趋势》, 方正证券研究所

美国和英国处在 FSS 天线罩研究的前列。工艺方面, 复合材料表面金属化技术以及激光刻蚀技术的发展促进了 FSS 天线罩的发展, 国外 FSS 天线罩的制作已经从准数控机械加工发展到数字仿真与数控加工一体化的阶段; FSS 的单元图形从间接转移发展成直接刻划; 另外, 无论是单屏 FSS 天线罩还是多屏 FSS 天线罩的制作, 国外已经达到了工程应用的水平。美国有专门制作 FSS 隐身天线罩的公司, 英国 BASE 公司的机载雷达罩宣传广告上大篇幅地介绍其在 FSS 雷达罩方面的设计软件和能力, 并有 FSS 雷达天线罩可供用户选用, 瑞典的 Applied Composite 公司也是世界上隐身天线罩的主要研制者, 他们的主要技术就是 FSS。

FSS 隐身天线罩在美国已投入了工程应用, 先是应用于导弹, 后又应用于飞机上。据悉, 美国轻型喷气运输机 C-140 使用了 FSS 雷达罩, 而以 F-22 和 F-35 为代表的第五代战斗机雷达天线罩, 就采用了“脊”形尖削锥体的隐身气动外形和 FSS 技术实现了带外隐身和带内传输的功能。法国的拉斐特隐身战舰的天线罩就采用了频率选择表面, 并结合外形设计达到雷达隐身的目的。

4 风险提示

我国隐身装备发展速度不及预期; 隐身技术更迭较快导致企业技术落后; 隐身技术扩散导致竞争加剧。

分析师声明

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，保证报告所采用的数据和信息均来自公开合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，本报告清晰准确地反映了作者的研究观点，力求独立、客观和公正，结论不受任何第三方的授意或影响。研究报告对所涉及的证券或发行人的评价是分析师本人通过财务分析预测、数量化方法、或行业比较分析所得出的结论，但使用以上信息和分析方法存在局限性。特此声明。

免责声明

本研究报告由方正证券制作及在中国（香港和澳门特别行政区、台湾省除外）发布。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告内容仅供我公司适当性评级为C3及以上等级的投资者使用，本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。若您并非前述等级的投资者，为保证服务质量、控制风险，请勿订阅本报告中的信息，本资料难以设置访问权限，若给您造成不便，敬请谅解。

在任何情况下，本报告的内容不构成对任何人的投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需求，方正证券不对任何人因使用本报告所载任何内容所引致的任何损失负任何责任，投资者需自行承担风险。

本报告版权仅为方正证券所有，本公司对本报告保留一切法律权利。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，不得将报告内容作为诉讼、仲裁、传媒所引用之证明或依据，不得用于营利或用于未经允许的其它用途。如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处且不得进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

公司投资评级的说明：

强烈推荐：分析师预测未来半年公司股价有20%以上的涨幅；

推荐：分析师预测未来半年公司股价有10%以上的涨幅；

中性：分析师预测未来半年公司股价在-10%和10%之间波动；

减持：分析师预测未来半年公司股价有10%以上的跌幅。

行业投资评级的说明：

推荐：分析师预测未来半年行业表现强于沪深300指数；

中性：分析师预测未来半年行业表现与沪深300指数持平；

减持：分析师预测未来半年行业表现弱于沪深300指数。

地址	网址： https://www.foundersc.com	E-mail: yjzx@foundersc.com
北京	西城区展览馆路48号新联写字楼6层	
上海	静安区延平路71号延平大厦2楼	
上海	浦东新区世纪大道1168号东方金融广场A栋1001室	
深圳	福田区竹子林紫竹七道光大银行大厦31层	
广州	天河区兴盛路12号楼 隽峰苑2期3层方正证券	
长沙	天心区湘江中路二段36号华远国际中心37层	