



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属

理论与技术前沿丛书
SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

耐高温结构吸波碳纤维复合材料 制备及性能研究

PREPARATION AND PROPERTIES OF THE HIGH-TEMPERATURE RESISTANT
AND CARBON FIBER BASED RADAR ABSORBING COMPOSITES

肖鹏 周伟 著
Xiao Peng Zhou Wei



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

耐高温结构吸波碳纤维 复合材料制备及性能研究

PREPARATION AND PROPERTIES OF THE HIGH - TEMPERATURE
RESISTANT AND CARBON FIBER BASED RADAR ABSORBING COMPOSITES

肖鹏 周伟 著

Xiao Peng Zhou Wei



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

耐高温结构吸波碳纤维复合材料制备及性能研究/肖鹏,周伟著.
—长沙:中南大学出版社,2016.1

ISBN 978-7-5487-2284-7

I. 耐... II. ①肖... ②周... III. 碳纤维增强复合材料-研究
IV. TB334

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第110025号

耐高温结构吸波碳纤维复合材料制备及性能研究

肖 鹏 周 伟 著

责任编辑 刘 灿

责任印制 易红卫

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙超峰印刷有限公司

开 本 720×1000 1/16 印张 21.5 字数 417千字

版 次 2016年1月第1版 印次 2016年1月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5487-2284-7

定 价 110.00元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

当今世界军事强国均在大力发展耐高温结构隐身材料来提高空中武器装备的生存和突防能力，并已进入实用化阶段；我国研制新型空中武器装备对耐高温结构隐身材料提出了迫切需求。以碳纤维作为吸波剂和增强、增韧相的碳纤维复合材料，具有轻质、高强、耐高温等一系列优异性能，可望成为耐高温结构隐身部件的关键材料体系。

作者领导研究团队在国家 973 计划等国家重大科研项目资助下，系统开展了耐高温结构隐身一体化碳纤维复合材料的理论与制备技术研究，取得了多项突破。本书详细阐述了雷达隐身材料基本知识，耐高温吸波材料研究现状；系统介绍了研究团队在碳纤维电磁响应特性，碳纤维本征介电常数提取，碳纤维及基体介电性能调控，耐高温碳纤维阵列/碳化硅吸波材料制备与性能，以及耐高温碳纤维/氮化硅吸波材料制备与性能方面的研究进展与突破。本著作适合于无机非金属材料科学与工程专业的大专院校师生使用，以及供从事雷达隐身材料、电磁屏蔽材料等科研与生产的人员作为参考资料。

作者简介

About the Authors

肖鹏，男，1970年5月出生，博士，中南大学二级教授，博士研究生导师。2000年在西北工业大学获得工学博士学位；2001—2003年中南大学材料科学与工程博士后流动站工作；2002年破格晋升教授；2004年被聘为博士生导师。长期从事新结构高性能碳基复合材料的新技术、基础理论和应用研究，先后承担了国家973计划、总装重大支撑专项和国家自然科学基金等18项国家级科研项目。已发表SCI论文151篇，其中第一或通讯作者73篇；第一发明人申请国家发明专利31项，其中授权17项；2013年获湖南省科技发明一等奖(排名第一)。

兼任中国粉末冶金七协学会联席会议秘书长，粉末冶金与金属陶瓷学术委员会秘书长，SAMPE北京理事会常务理事、碳/碳复合材料专业委员会主任，中国材料研究学会理事会理事，中国机械工程学会摩擦学分会青年工作委员会委员及专业委员会委员，中国航空学会复合材料专业分会非聚合物基复合材料专业委员会委员。

周伟，男，1986年4月出生，博士。2014年博士毕业于中南大学粉末冶金研究院材料学专业，现在湖南工业大学从事教学和科研工作。主要从事碳纤维增强陶瓷基复合材料、隐身材料、纳米纤维以及功能陶瓷的研究和开发工作。先后承担或参与国家级科研项目10余项，在本领域国际著名刊物(SCI、EI检索)发表论文20余篇，申请国家发明专利5项，已授权4项。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张懿	中国工程院院士	陈景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周廉	中国工程院院士	钟掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主任

罗涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

陈春阳(教授 中南大学党委常委、副校长)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东 王飞跃

委员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 谭晓萍

陈灿华 胡业民 史海燕 刘辉 谭平

张曦 周颖 汪宜晔 易建国 唐立红

李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础，是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国，我国在有色金属研究领域，特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速，产量连年来居世界首位，有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时，有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出，对国外资源的依赖程度逐年增加，严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展，已探明的优质矿产资源接近枯竭，不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机，而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后，对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合有色金属科技图书的出版，对于提高我国有色金属工业的自主创新能力，促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用，确保我国有色金属产业的可持续发展，具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目，“有色金属理论与技术前沿丛书”计划出版 100 种图书，涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。“有色金属理论与技术前沿丛书”瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程技术方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在“有色金属理论与技术前沿丛书”的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、科研院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王淀佐

2010年12月

前言

Foreword

世界各国防御体系的探测、追踪、攻击能力越来越强，军事目标的生存能力和武器系统的突防能力日益受到严重威胁，被发现即被摧毁已成为事实，发展和应用高性能结构型隐身材料已成为现代国防体系十分重要和关键的方向。

超声速和高超声速飞行器等新一代空中武器装备的头锥、进气道、尾喷管、翼缘等部位受到燃气和(或)高速气流冲刷，局部工作温度将达 1000°C 以上，是显著的雷达暴露源，迫切需求耐高温结构隐身一体化材料。各军事强国正积极研制耐高温结构与隐身一体化材料来提高新型武器装备的生存与突防能力。国外耐高温结构/隐身材料在巡航导弹等飞行器上已经进入实际应用阶段；而我国尚处于起步阶段，与国外相比存在较大技术差距，亟待大力发展并取得突破。

碳纤维复合材料具有低密度、高比强、高比模、低膨胀系数、耐环境性能优良等优点，并且其结构和电性能具有较强的可设计性，易于实现介电性能匹配，制备出高性能的耐高温结构隐身材料，是当前能突破 1000°C 以上高温的结构隐身材料体系之一，可望应用于新型空中武器装备关键部件。

本书系统介绍了著者在耐高温结构隐身一体化碳纤维复合材料的基础理论、制备技术与性能等方面的研究工作，在详细介绍雷达隐身材料基本知识、耐高温吸波材料研究现状的基础上，重点介绍了碳纤维电磁响应特性，碳纤维本征介电常数提取，碳纤维及基体介电性能调控，耐高温碳纤维阵列/碳化硅吸波材料制备与性能，以及耐高温碳纤维/氮化硅吸波材料制备与性能方面所取得的研究进展与突破。

第1章简述了雷达隐身技术、隐身材料的工作原理与性能表征方法，以及隐身材料的分类和发展趋势；第2章介绍了耐高温雷达吸波材料的研究现状，以及隐身材料高温介电及吸波性能的

研究进展；第3章介绍了著者在碳纤维电磁波响应特性方面的研究工作，主要是碳纤维的介电特性、磁损耗特性和微波衰减特性；第4章介绍了著者在碳纤维径向和本征轴向介电常数提取方面的工作，包括建立相关介电模型及提取介电常数；第5章介绍了著者在碳纤维表面改性及介电特性调控方面的工作，主要研究了BN等陶瓷涂层及纳米纤维改性碳纤维表面调节介电性能；第6章介绍了基体相改性及其介电特性调控研究工作，主要是BN包覆和SiO₂掺杂改性基体碳，以及SiCw/Si₃N₄复合基体的制备和性能；第7章和第8章则是在前述工作基础上，分别详细介绍了耐高温碳纤维阵列/碳化硅吸波材料和耐高温碳纤维/氮化硅吸波材料的结构和成分设计、制备及性能研究工作；第9章对本书的研究工作进行总结并对耐高温结构隐身一体化材料未来的发展进行展望。

本书是著者领导研究团队多年研究成果的汇集，当年在团队攻读博士学位的周伟、卢雪峰、洪文、罗衡、肖伟玲，攻读硕士学位的杨益、周亮、唐益群、张隽、黄龙等，在耐高温结构吸波碳纤维复合材料的基础理论、制备技术与性能等方面开展了许多卓有成就的研究。团队的硕士生陈文博、刘洋、俞晓宇、王依晨等对全书的大量图片进行了整理和修正。在此表示衷心的感谢！

本著作所涉及的研究工作得到了国家重点基础研究发展计划(973计划)项目、航天科工集团重大创新项目、国防项目等重大国家课题的资助，在此谨表谢忱。

限著者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，诚请读者批评指正。

著者

2015年12月

第 1 章 雷达吸波材料概述	1
1.1 雷达隐身技术	1
1.1.1 赋形	2
1.1.2 雷达吸波材料	3
1.1.3 有源与无源阻抗加载	3
1.2 雷达吸波材料设计原理及性能表征方法	4
1.2.1 微波损耗原理	4
1.2.2 微波性能预测	10
1.2.3 波导法电磁参数表征方法	15
1.2.4 弓形法反射率测量原理	19
1.3 雷达吸波材料研究概况	20
1.3.1 吸波材料设计	20
1.3.2 涂层型吸波材料	22
1.3.3 结构型吸波材料	23
1.3.4 吸波材料的发展趋势	23
第 2 章 耐高温雷达吸波材料的发展	25
2.1 耐高温雷达吸波材料研究现状	25
2.1.1 国外研究现状	25
2.1.2 国内研究现状	27
2.2 耐高温雷达吸波材料组元研究进展	28
2.2.1 吸波剂的研究进展	28
2.2.2 基体的研究进展	35
2.3 材料高温介电及吸波性能研究进展	37
2.3.1 理论研究	37
2.3.2 实验研究	37

第3章 碳纤维电磁波响应特性	39
3.1 碳纤维的介电特性	39
3.1.1 定向平行排布连续碳纤维的介电性能	39
3.1.2 随机分布短切碳纤维的介电性能	42
3.2 碳纤维的磁损耗特性	44
3.2.1 碳纤维阵列复合材料制备及表征	45
3.2.2 碳纤维阵列复合材料电磁性能	45
3.2.3 碳纤维阵列结构的磁响应模型	46
3.2.4 碳纤维阵列结构的高温磁损耗	51
3.3 碳纤维的微波衰减特性	53
3.3.1 连续碳纤维定向平行排布结构复合材料微波衰减特性	53
3.3.2 连续碳纤维格子结构 FSS 复合材料微波衰减特性	57
3.3.3 碳纤维网胎贴片结构 FSS 复合材料微波衰减特性	66
3.3.4 多层碳纤维 FSS 复合材料结构设计及其微波衰减特性	77
第4章 碳纤维本征介电常数提取	89
4.1 碳纤维径向介电常数提取	89
4.1.1 碳纤维阵列复合材料制备及表征	89
4.1.2 碳纤维阵列复合材料介电性能	90
4.1.3 碳纤维阵列结构介电模型的建立与验证	92
4.1.4 碳纤维阵列结构介电模型的应用	95
4.2 碳纤维轴向介电常数提取	99
4.2.1 随机分布碳纤维复合材料制备及表征	100
4.2.2 随机分布碳纤维复合材料介电性能	100
4.2.3 随机分布碳纤维介电模型	101
4.2.4 纤维长度对碳纤维轴向介电常数的影响	104
4.2.5 碳纤维轴向介电常数提取	107
第5章 碳纤维表面改性及介电特性	109
5.1 BN 涂层改性	109
5.1.1 BN 涂层改性碳纤维的制备研究	109
5.1.2 BN 涂层改性碳纤维的微观结构与化学成分	113
5.1.3 BN 涂层改性碳纤维的性能研究	116
5.2 SiC 涂层改性	124

5.2.1	含 C 界面相 SiC 涂层改性	124
5.2.2	含 BN 界面相 SiC 涂层改性	128
5.3	原位生长纳米纤维改性	134
5.3.1	纳米纤维改性碳纤维的制备	135
5.3.2	原位生长纳米纤维的微观结构	135
5.3.3	原位生长纳米纤维对碳纤维表层结构的影响	142
5.3.4	原位生长纳米纤维改性碳纤维的性能研究	145
第 6 章	基体相改性及介电特性	152
6.1	基体碳 BN 包覆改性	152
6.1.1	BN 涂层包覆改性热解碳粉的制备	152
6.1.2	BN 涂层包覆改性热解碳粉的微观结构和化学成分	152
6.1.3	BN 涂层包覆改性热解碳粉的形成机制	154
6.1.4	BN 涂层包覆改性热解碳粉的性能研究	156
6.2	基体碳 SiO ₂ 掺杂改性	162
6.2.1	SiO ₂ 掺杂改性热解碳粉的制备	162
6.2.2	SiO ₂ 掺杂改性热解碳粉的成分与微观结构	162
6.2.3	SiO ₂ 掺杂改性热解碳粉的性能研究	163
6.3	碳化硅晶须/Si ₃ N ₄ 复合陶瓷基体	168
6.3.1	SiC _w /Si ₃ N ₄ 复合陶瓷基体的制备	169
6.3.2	SiC _w /Si ₃ N ₄ 复合陶瓷基体的微观结构	176
6.3.3	SiC _w /Si ₃ N ₄ 复合陶瓷基体的力学性能	180
6.3.4	SiC _w /Si ₃ N ₄ 复合陶瓷基体的介电性能和吸波性能	186
第 7 章	耐高温碳纤维阵列/碳化硅 - 氧化硅吸波材料	195
7.1	碳纤维阵列/碳化硅 - 氧化硅吸波材料设计	195
7.1.1	预制体中碳纤维径向介电常数	195
7.1.2	最佳基体介电常数范围	197
7.2	碳化硅基体介电特性及成分设计	198
7.2.1	凝胶 - 注模制备碳化硅及其介电特性	198
7.2.2	化学气相沉积制备碳化硅及其介电特性	203
7.2.3	碳化硅粉末及其介电特性	207
7.2.4	基体成分设计及验证	212
7.3	耐高温碳纤维阵列/碳化硅 - 氧化硅吸波材料制备及性能表征	217
7.3.1	碳纤维阵列/碳化硅 - 氧化硅复合材料制备及表征	217

7.3.2	碳纤维阵列/碳化硅-氧化硅复合材料介电性能	217
7.3.3	碳纤维阵列/碳化硅-氧化硅复合材料吸波性能	220
第8章	耐高温碳纤维/氮化硅吸波材料	226
8.1	耐高温 $C_f - Si_3N_4$ 吸波材料结构设计	226
8.1.1	耐高温 $C_f - Si_3N_4$ 吸波材料结构形式	226
8.1.2	$C_f - Si_3N_4$ 复合材料反射率综合设计模型	231
8.1.3	实验验证	237
8.2	耐高温多层结构 $C_f - Si_3N_4$ 吸波材料制备及结构	239
8.2.1	Si_3N_4 陶瓷基体的凝胶注模预成型	239
8.2.2	Si_3N_4 陶瓷的脱脂和烧结	247
8.2.3	Si_3N_4 陶瓷基体的微结构	254
8.2.4	多层结构 $C_f - Si_3N_4$ 复合材料制备	257
8.3	$C_f - Si_3N_4$ 复合材料氧化性能及力学性能	260
8.3.1	氧化性能	261
8.3.2	力学性能	266
8.4	$C_f - Si_3N_4$ 复合材料介电性能及其响应机理	268
8.4.1	Si_3N_4 陶瓷基体的介电特性	268
8.4.2	单夹层结构 $C_f - Si_3N_4$ 复合材料介电性能及其响应机理	272
8.4.3	多夹层结构 $C_f - Si_3N_4$ 复合材料介电性能及其响应机理	278
8.5	$C_f - Si_3N_4$ 复合材料高温介电性能及吸波性能	282
8.5.1	Si_3N_4 陶瓷基体的高温介电性能及其响应机理	282
8.5.2	$C_f - Si_3N_4$ 复合材料高温介电性能	285
8.5.3	$C_f - Si_3N_4$ 复合材料高温介电响应机理	288
8.5.4	$C_f - Si_3N_4$ 复合材料高温吸波性能	295
第9章	展望	299
	参考文献	301

第1章 雷达吸波材料概述

随着现代战争中探测和制导技术的迅猛发展,军事目标的生存能力和武器装备的突防能力日益受到严重威胁。在现代军事对抗中,针对飞行器的探测技术日益完善,夺取和保持信息权已成为信息化作战的焦点,失去信息获取和控制的能力将变成“看不见”“听不见”的活靶子,“被发现即被摧毁”在现代战争中已成为事实。因而,如何将武器装备隐身,提高其战场生存与突防能力,已受到世界各国广泛重视,并迅速发展成为一项专门技术——隐身技术。

隐身技术是顺应现代武器装备发展而出现的一项高新技术,是当今世界三大军事尖端技术之一。隐身技术对现代武器装备的发展和未来战争将产生深远影响,是现代战争取胜的决定性因素之一。海湾战争中,美军动用了44架F117隐身战斗机,出动近1271架次,以仅占2%的总出动架次,承担了攻击目标总数的40%,竟无一受损^[1]。1991年,美军隐身飞机悄无声息地穿越伊拉克雷达覆盖区,向伊拉克境内军事目标发起攻击。1999年,美国空军出动两架B-2隐身轰炸机参与科索沃战争,对南联盟境内目标投下了多枚全球定位系统制导的炸弹。当今世界军事强国已把隐身技术提升到与电子信息战技术同等地位来发展。隐身技术又称为“低可探测技术”,是指在一定范围内降低武器装备的可探测信号特征,减小武器装备被敌方信号探测系统发现概率或者缩短发现距离的综合性技术^[2]。应用于现代战争中的隐身技术主要有可见光隐身技术、雷达微波隐身技术、红外隐身技术、激光隐身技术、声波隐身技术以及复合隐身技术等^[3]。在目前的侦察、探测系统中,雷达仍是探测军事目标最主要和最可靠的手段^[4],占80%以上;对红外侦察系统而言,要对目标实施精确致命打击仍需雷达系统作引导。因此,雷达隐身技术仍是当前隐身技术研究的重点。

1.1 雷达隐身技术

雷达隐身技术是通过缩减雷达目标特征,最大限度地降低雷达探测系统发现和识别目标的概率,从而极大提升飞行器在战争环境中突防、生存能力的低可探测技术。它涉及空气动力学、材料学、电磁学等多学科交叉融合。由雷达方程可得自由空间中雷达的最大探测距离为^[5]:

$$R_{\max} = \left(\frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma \cdot \lambda^2 \cdot G_r}{64\pi \cdot L \cdot P_{\min}} \right)^{1/4} \quad (1-1)$$

式中： P_t 为雷达发射功率， G_t 为发射天线增益， G_r 为接收天线增益， λ 为雷达工作波长， L 为系统和传播损耗， P_{\min} 为雷达最小接收功率， σ 为目标雷达散射截面。

由式(1-1)可知，雷达的最大探测距离正比于目标雷达散射截面，目标雷达散射截面越大，则目标越早被探测雷达发现，目标被追踪打击的概率越大。因此，提升目标雷达隐身性能的关键在于如何缩减目标雷达散射截面。随着雷达隐身技术的发展，各类目标的雷达散射截面已几乎与目标体积大小没有关系，如一颗直径 1 m 的龙伯球散射体的雷达散射截面可达 2000 m²，而一架长达 20.1 m 的 F117A 的雷达散射截面仅为 0.02 m²[6]，飞进距雷达 90 km 范围内才被发现。类似尺寸的非隐身飞机 B-52 雷达散射截面却高达 100 m²，飞进敌方雷达 901 km 范围内即可被发现[7]。而一旦被敌方探测雷达发现，便会采取打击措施，因此，提升武器装备生存能力的关键在于缩减目标雷达散射截面。

缩减雷达散射截面的方法主要有赋形、雷达吸波材料、无源及有源阻抗加载。一般来讲，赋形是控制目标雷达散射截面的第一步，然后采用雷达吸波材料弥补赋形缩减技术的不足之处[8]。

1.1.1 赋形

赋形是一种通过改变目标外部特征减少沿特定方向(通常是后向散射)的雷达波反射信号的隐身技术。F117A 飞机隐身总设计师曾经说过，F117A 的隐身设计关键是“外形、外形、外形、材料”，因此，飞机的隐身外形设计十分重要，如果隐身飞机的外形设计水平不高，后期依靠吸波材料也难以弥补[9]。

尽管修剪目标外部特征的赋形技术可有效缩减雷达散射截面，但目标外部特征同样影响着飞机气动性能，F117A 的设计就是这样一个极端的例子：Lockheed Martin 公司基于多面体反射原理，利用上百块平板拼接成 F117A 的机身，这架具有超高隐身性能的战机在雷达上显示比小鸟还小。正因为这是一架由电磁工程师而非气动工程师设计的飞机。该飞机气动外形不佳，阻力大，仅有亚声速气动性能，只能依靠高隐身性能在夜里隐蔽出航执行任务。

赋形的目的在于通过修整目标的形状轮廓、边缘与表面，使其在雷达主要威胁方向(后向散射、鼻锥前向 $\pm 30^\circ \sim 45^\circ$ 范围)上获得雷达散射截面的缩减[6]。赋形技术通常将雷达回波从一个视角转移到另一个视角，从而降低高威胁区的反射回波[10]，因此，赋形对于缩减特定角度的雷达散射截面有突出作用。外形设计技术可达雷达散射截面总缩减量的 30% 左右[7]，但一个角度范围内雷达散射截面的缩减常常伴随着另一角度范围内雷达散射截面的增加，而全角度范围缩减目标