

引用格式: 王恩亮, 袁成, 赵玉杰, 等. 国外高超声速防御能力发展及关键技术分析[J]. 航空兵器, 2024, 31(4): 14-20.

Wang Enliang, Yuan Cheng, Zhao Yujie, et al. Analysis of the Development and Key Technologies of Hypersonic Defense Capability in Foreign Countries [J]. Aero Weaponry, 2024, 31(4): 14-20. (in Chinese)

# 国外高超声速防御能力发展及关键技术分析

王恩亮<sup>1,2</sup>, 袁成<sup>1,2\*</sup>, 赵玉杰<sup>1,2</sup>, 高书亮<sup>1,2</sup>

(1. 中国航空研究院, 北京 100029; 2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘要:** 随着高超声速武器快速发展并被应用于实际战场, 国外对高超声速防御技术的需求也变得越发迫切。由于高超声速武器的目标特性有别于传统导弹, 现有导弹防御系统难以取得好的拦截效果, 需重新研发相关装备与技术。为梳理未来高超声速防御技术需求方向, 本文从预警探测、拦截打击等方面对美国、俄罗斯、日本等国家的高超声速防御能力现状进行了总结, 并对相关关键技术进行分析, 提出未来高超声速防御需重点关注拦截距离提高、作战成本降低和体系攻击手段应对等方面。

**关键词:** 高超声速; 防御; 反临; 拦截; 探测

中图分类号: TJ760

文章编号: 1673-5048(2024)04-0014-07

文献标识码: A

DOI: 10.12132/ISSN.1673-5048.2023.0223

## 0 引言

高超声速武器是指在大气层内的飞行速度超过马赫数5的武器, 其具备速度快、射程远、机动能力强等特点。高超声速导弹防御有其独有特点: 一是轨迹多变, 位置难以预测。高超声速导弹飞行于大气层内, 可利用气动力改变飞行轨迹, 吸气式高超声速巡航导弹还可利用发动机进行大范围的横向机动<sup>[1]</sup>, 传统的依靠弹道计算来预测导弹轨迹的方法已不再适用, 只能靠持续地探测跟踪确定其位置。二是轨道高度低, 可探测距离近。高超声速导弹的轨道大大限制了地基雷达的探测距离, 国外现役战略预警雷达对高超声速目标的最大发现距离仅在1000 km左右, 这只能提供约11 min的预警时间。2022年3月, 俄罗斯首次在实战中使用了高超声速武器——“匕首”导弹, 该弹在约10 min内飞过900 km, 打击了乌克兰的一个地下弹药库, 其间乌克兰反导拦截系统及美军的战场监视飞机都未能捕获该弹踪迹<sup>[2]</sup>。高超声速武器与传统弹道导弹也有一些共性, 美国国会会在《美高超声速武器及其替代方案》中指出, 在打击末段, 高超声速导弹并不比带有机动弹头的弹道导弹具备更强的生存能力, 二者都具备高速和高机动性。

上述原因导致了如下的高超声速防御现状: 对于如“标准6”和“爱国者3”等末段导弹防御系统而言, 拦截高超声速导弹和传统弹道导弹的区别不大; 对于中段防

御系统, 如“陆基拦截弹(GBI)”, 高超声速导弹的防御难度要远高于弹道导弹。由于导弹飞行末段时间窗口短, 一般只有一次末段拦截机会, 拦截成功率不高<sup>[3]</sup>, 且在国土面积辽阔的大国, 很难实现末段防御系统的全面覆盖, 需通过中段防御系统对来袭导弹进行尽可能广泛的防御, 目前该思路不适用于高超声速导弹。为解决此问题, 需要发展高超声速目标远程预警跟踪和拦截能力。当前关于高超声速防御体系、策略及特征趋势的研究较多<sup>[4-7]</sup>, 本文主要概述了国外高超声速防御的最新进展以及现有装备能力, 并对高超声速防御关键技术进行了分析。

## 1 国外高超声速防御现状

### 1.1 美国高度重视, 发展领先

美国导弹防御局正在利用现有的防御系统来开发集成架构和能力, 以对抗来自弹道导弹、高超声速导弹和巡航导弹不断发展的威胁, 其2024财年总预算为109亿美元, 其中与高超声速防御相关的项目主要包括: 5.542亿美元改进C2BMC系统, 正在部署的螺旋8.2-5可为高超声速威胁提供初始态势感知和跟踪能力; 8.017亿美元用于开发关岛导弹防御体系架构, 包括升级雷达、开发关岛“宙斯盾”系统、开展防御技术测试、改进通信系统等; 2.09亿美元用于继续开发针对高超声速武器的“滑翔段拦截器”; 1.095亿美元用于太空跟踪传感器、

收稿日期: 2023-11-17

作者简介: 王恩亮(1996-), 男, 河南信阳人, 硕士。

\*通信作者: 袁成(1987-), 男, 北京人, 高级工程师, 硕士。



免费获取电子版

天基杀伤评估系统;另有超过 32 亿美元用于“萨德”末段防御系统、陆基中段防御系统、下一代拦截器等导弹防御系统的开发。美国除导弹防御局外,美国国防部另投资超过 130 亿美元用于区域和战略导弹防御能力升级,包括美国空军 1.62 亿美元用于要地导弹防御和远程雷达改进,美国太空部队 40 亿美元用于弹道和高超声速导弹红外跟踪技术开发、升级预警雷达和延长传统雷达寿命,美国陆军 40 亿美元用于采购“爱国者 3”拦截弹和其他区域防御系统,美国海军 28 亿美元用于“宙斯盾”系统、“标准”系列导弹等装备的采购,其他机构 21 亿美元用于导弹防御新技术的开发和演示。

美国太空发展局(SDA)开发了“扩散作战人员空间架构(PWSA)”,目标是形成一个七层卫星架构,分别为提供面向先进导弹威胁(包括高超声速目标)的指示、告警、跟踪和瞄准的跟踪层,用于将跟踪层连接到拦截器及其他地面系统的传输层、支持移动地面资产定位的保管层,提供天基指挥与控制的作战管理层,提供潜在 GPS 拒止环境下替代定位、导航和定时的导航层,用于探测深空潜在的敌对行动的威慑层和以方便其他卫星运用为目标的支持层。一旦完全投入使用,PWSA 将包括 550 颗卫星,并提供全面的全球覆盖。该项目于 2020 年采购了 0 阶段的 28 颗卫星,其中 19 颗为数据传输卫星,8 颗为配备宽视场的导弹预警/跟踪卫星,1 颗留在地面用于软件调试,2023 年已完成了两次发射,分别在 4 月(10 颗)和 9 月(13 颗),两组卫星均工作于高度 1 000 km 左右的轨道,预计年内将再发射 4 颗。太空发展局计划于 2024 年开始发射 1 阶段的 172 颗卫星,2026 年开始实施 2 阶段项目。

2019 年,美国开展了“高超声速与弹道跟踪太空传感器(HBTSS)”项目,计划发射数百颗低地球轨道(LEO)卫星,对来袭的弹道导弹和高超声速导弹进行探测、跟踪和识别。HBTSS 的部分卫星装备用于弱小目标检测的高灵敏度多波长光学中视场传感器,可与具有宽视场传感器的 PWSA 跟踪层卫星协同工作。该项目暂由美国导弹防御局牵引(后期计划移交太空发展局),由哈里斯技术和诺格公司进行卫星研制,计划在 2023 年四季度发射 2 颗卫星,并参与 2024 年的导弹防御实验。

2022 年 12 月,美国太空探索技术公司(SpaceX)发布了“星盾”计划,旨在将商业低轨卫星技术提供给美国政府和军方客户,其卫星将具备通信、遥感和载荷托管三项功能。

上述三个天基项目的发展将大大增强美国对高超声速目标的跟踪探测能力。

美国主要投资的拦截弹项目为“滑翔段拦截器”和“滑翔破坏者”。“滑翔段拦截器”由美国导弹防御局投资,旨在采用动能毁伤的方式对处于滑翔段的高超声速助推滑翔导弹实施拦截,该拦截弹将首先被集成到“宙斯盾”系统中用于海基高超声速防御。项目最初由雷神、洛马和诺格三家公司进行竞争性开发,其中雷神公司的方案于 2022 年 9 月完成原型系统需求评审,2023 年 4 月

过渡到技术开发阶段。美国众议院要求加快该项目的研究,于 2029 年实现部署。“滑翔破坏者”项目由美国国防高级研究计划局牵引,主要研究高空、高速、近距离条件下拦截弹的姿轨可靠控制技术,2018 年由洛克达因和诺格公司进行第一阶段开发,2023 年 9 月开始由波音公司继续进行第二阶段开发。

现阶段美国可能用于高超声速防御的预警探测装备包括部分天基卫星,如“天基红外系统(SBIRS)”;陆基雷达系统,如 AN/TPY-2 雷达、远程识别雷达;加装红外传感器的无人机,如“全球鹰”、“捕食者”等。打击装备主要有进行了“联合紧急作战需求(JEON)”能力升级的“萨德”和“爱国者 3”联合防御系统,海基“标准 6”拦截弹。

## 1.2 俄罗斯初步验证陆基高超声速目标探测和打击能力

探测方面,俄罗斯境内已部署 10 部陆基战略预警雷达,包括 7 部“沃罗涅日”和 3 部早期建设的雷达,可基本实现所有导弹来袭方向的覆盖。其中“沃罗涅日”雷达为俄罗斯当前最先进的反导预警雷达,2006 年开始部署,探测距离最远可达 6 000 km<sup>[8]</sup>,足以发现地球曲率视距内的高超声速目标。此外,俄罗斯还计划部署“集装箱”天波超视距雷达,该雷达可利用地球大气电离层对部分频段雷达波的反射效应,探测地平线以外的目标,对高超声速导弹有较好的发现能力。天基预警方面,俄罗斯正在开发“穹顶”项目,截至 2022 年底,已发射了 6 颗“苔原”导弹预警卫星,计划在 2024 年前完成全部 10 颗卫星发射。“苔原”卫星装备了红外和光学探测器,可监视弹道导弹发射活动,理论上也可探测到处于助推阶段的高超声速武器。2021 年 2 月,俄罗斯无线电专家称已通过实验验证了预警雷达对高超声速目标的探测能力。

打击方面,俄罗斯现已形成由“铠甲-SM”、“山毛榉”、S-300、S-400、S-500 防空反导系统形成的多层防空反导体系<sup>[9]</sup>。其中 S-500 系统配备了多种雷达和拦截弹,可用于反导和反低轨卫星,该系统于 2002 年开始研制,2021 年 10 月首批交付部队,随后在当年 12 月测试了其高超声速武器的拦截能力<sup>[10]</sup>。

## 1.3 日本在高超声速防御领域积极寻求与美合作

日本正在计划开发天基和空基高超声速探测能力。天基方面,日本在 2020 年 6 月发布的《宇宙基本计划》中提出,将与美国合作开展小型卫星星座研究,探索其在空间预警方面的应用<sup>[11]</sup>,两年后,日本再次提到该计划,据日媒 2022 年 11 月报道,日本防卫省计划部署由 50 颗低轨卫星组成的星座,用于对高超声速导弹进行跟踪探测。空基方面,日本计划给无人机配备红外传感器以探测高超声速导弹,截至 2022 年 11 月,日本航空自卫队已经订购了 3 架美国“全球鹰”Block 30 型高空侦察无人机<sup>[12]</sup>。

开发新型拦截弹也被提上日程。日本当前拥有从美国购买的“标准 3”和“爱国者 3”等反导系统<sup>[13]</sup>,具备一定的高超声速目标拦截能力。2023 年 8 月,日本宣布和

美国联合开发“滑翔段拦截器”<sup>[14]</sup>。

#### 1.4 其他国家的高超声速防御方案

欧洲国家在高超声速防御领域采取联合发展的思路,下述项目都由欧洲防务基金支持、欧洲多国参与。法国主导了“天基战区监视及时预警拦截(TWISTER)”计划,旨在开发一款多用途反导系统,能够探测、跟踪中程机动弹道导弹和高超声速飞行器。在该计划的牵引下,2022年欧洲先后公布了两个拦截器项目,HYDIS2和HYDEF。HYDIS2由欧洲导弹集团(MBDA)领导,发布了名为“天鹰座(Aquila)”的多级拦截器概念,目前已提出三型方案,一型装备吸气式冲压发动机,两型装备常规火箭动力,计划在2030年形成第一批原型弹。HYDEF由西班牙塞纳航空航天公司领导,计划在2035年前开发大气层内高超声速拦截器。此外,德国主导了一个名为“奥丁之眼(Odin's Eye)”的天基预警项目,支持对弹道导弹和高超声速目标的早期预警,该项目已经完成了为期24个月的一期研究,2023年7月又获得欧盟9000万欧元经费,以进行为期3年的二期开发。

以色列国防公司拉斐尔2023年6月公布了一款名为“天空声速(Sky sonic)”的高超声速拦截弹,该拦截弹为两级架构,二级为一个动力子弹形状的杀伤弹头,可同时用于高超声速滑翔导弹和吸气式巡航导弹的拦截。

#### 1.5 国外现状分析

从当前的世界形势来看,美国作为军事力量优势国,主要面临的高超声速威胁是战时对其航母、军舰的打击,限于高超声速武器技术的发展现状,其本土受到的威胁较小,因此美国的高超声速拦截弹技术发展首先着眼于海上。基于其反导技术基础,美国当前已具备一定的高超声速末端防御能力,未来预计将首先完成天基预警系统和指挥控制系统的升级开发,于2029年完成拦截打击装备部署,形成较为完备的高超声速防御装备体系,同时进一步提升美国对其他类型导弹、飞行器的防御能力。日本、韩国等与美国交好的国家可能以联合开发或装备购买的方式受益于美国在高超声速防御领域的发展。俄罗斯作为当前高超声速武器技术最成熟的国家,在高超声速拦截弹的开发和验证方面具备较大优势。

## 2 高超声速防御关键技术分析

### 2.1 高空大功率探测平台技术

大功率地基雷达对高超声速飞行器的探测距离受地球曲率限制较大。地球曲率影响下的雷达视距计算式为

$$L \approx 4.12 \times (\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}) \quad (1)$$

式中: $L$ 为雷达视距(km); $H_1$ 为雷达阵面高度(m); $H_2$ 为目标高度(m)。取 $H_1 = 10$  m, $H_2$ 在0到100 km内变化,可得地基雷达视距与目标高度的关系如图1所示,当高超声速目标飞行高度为25 km时,雷达视距为664 km。

如预警机等空基雷达平台目前受功率和天线尺寸限制,探测距离较近,在百公里量级。

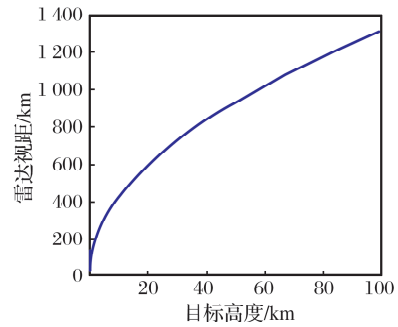


图1 地基雷达视距与目标高度的关系

Fig. 1 Relationship between ground based radar's range of sight and target altitude

为进一步提升雷达对高超声速目标的探测距离,可考虑将大功率雷达搬到高空,较具前景的有高空球载雷达方案。美国的超长时气球工程已做到将载荷2268 kg的气球在33.5 km高空悬浮46天<sup>[15]</sup>。当前球载雷达需解决长时大功率工作问题,可考虑发展针对高空气球的空中加油技术或远距激光输电技术,前者目前少有研究,后者正蓬勃发展,激光输电技术目前主要应用于小型无人机等近距小功率设备,技术成熟度有待提升<sup>[16]</sup>。

### 2.2 等离子效应影响下的探测技术

速度超过马赫数10的大气层内飞行器会形成表面等离子体鞘套和较长的等离子体尾流,该效应对雷达探测的影响有两面性:一方面等离子体尾流对于3~30 MHz频段的电磁波散射较强,其RCS甚至强于飞行器本体,采用工作于该频段的天波超视距雷达可增大对目标的发现距离<sup>[17]</sup>;另一方面,该尾流将导致雷达对目标本体的定位精度降低,这对于使用雷达导引头的拦截弹而言是致命的,为避免此问题,可采用多模复合探测技术,如雷达/红外复合探测。此外,等离子体鞘套对电磁波的反射、折射和吸收会使电磁波产生幅度调制和相位时变,造成逆合成孔径雷达(ISAR)距离像散焦问题,文献<sup>[18]</sup>采用基于分数阶傅里叶变换方法实现等离子体速度估计,并据此构建相位补偿因子,提高了ISAR成像质量。

### 2.3 高机动目标跟踪探测技术

高超声速目标的高机动性降低了雷达对其的跟踪能力。一方面,高速和高机动性将带来“跨波束”、“跨距离单元”、“跨多普勒单元”的问题;另一方面,在无法预测目标轨迹的情况下,较大的横向机动范围使得雷达搜索方位角较大,搜索周期长,目标位置更新时间久。解决上述问题的关键是找到高效的高超声速机动目标跟踪探测方法,相关研究包括多模型交互式目标跟踪算法<sup>[19]</sup>,基于Keystone变换方法的凝视相参积累技术<sup>[20]</sup>,基于状态滤波、知识辅助和非线性回归神经网络方法的轨迹预测技术等<sup>[21]</sup>。在减少目标位置更新时间方面,可采用多雷达协同搜索和陆、空、天多域联合感知技术<sup>[22-23]</sup>。

### 2.4 红外卫星抗干扰技术

高超声速目标表面温度较高,易被红外探测系统发现。研究表明,高轨卫星可以探测到处于助推阶段和飞行末期的高超声速目标<sup>[24]</sup>,高度低于2000 km的低轨红

外卫星可探测到高超声速目标所有飞行阶段<sup>[25-26]</sup>。地基和空基红外探测系统由于大气透过率低、地平线遮挡等原因,探测距离稍弱<sup>[27]</sup>,且难以全球部署。因此装备红外传感器的低轨卫星是当下较为理想的高超声速预警探测平台。但由于卫星是从太空向地面探测,存在着较严重的环境杂波和可能的人为干扰,需开展红外抗干扰和虚警抑制技术研究,相关在研技术有红外成像噪声抑制与图像背景抑制技术,多维度、高分辨率探测技术,基于人工智能的目标识别技术等<sup>[28-29]</sup>。

## 2.5 高超声速弹头降温技术

由于高超声速目标红外特性明显,使用红外导引头可增大拦截弹的截获距离,还能避免目标表面等离子体效应的干扰。但在高空高速飞行的拦截弹上,需克服弹头高温对红外导引系统的影响。相关在研降温技术有能量点源沉积、边界层控制、表面微结构设计、逆向等离子体喷流等<sup>[30-31]</sup>。能量点源沉积法利用激光、微波等在飞行器前方区域注入能量,改变飞行器头部流场结构,降低波阻从而降低热流,目前该技术待解决的问题较多,离实用尚有距离;边界层控制技术即在飞行器表面贴附电极,产生强度变化的等离子体层,控制边界层湍流涡系,从而降低摩擦生热,应用该技术需考虑电极片对红外导引头头罩透光率、均匀性的影响;表面微结构技术源于对鲨鱼皮减阻机理的研究,即在飞行器上设计一定形状的微型凹凸结构,稳定边界层以达到减阻降温效果,相关研究表明其降温能力较弱,降温率仅在百分之十以内<sup>[30]</sup>;逆向喷流技术利用特定装置向来流方向喷射等离子体,以将激波推离飞行器表面,相关仿真研究表明,采用七角星形喷流孔可获得较好减阻降温效果,最大热流相比于无喷流方案降低 60.6%<sup>[32]</sup>。

## 2.6 多拦截弹协同控制技术

由于高超声速导弹具备高速、高机动性,处于初步发展阶段的拦截系统可能有较高的单次失败率,需考虑多弹协同拦截技术。多弹协同形式从时间上可分为分时协同和同时协同,分时协同令多弹在较短的时间间隔内先后对目标实施拦截,主要关注前后弹间信息传递和协同滤波模型的建立<sup>[33]</sup>。同时协同令多弹同时到达目标,关注多弹攻击的时间和空间约束<sup>[34]</sup>;时间约束即让多弹在飞行过程中保持相同的剩余时间,相应制导律有开、闭环控制两种,区别为开环控制完全依靠发射前设定的算法运行,而闭环控制需要引入弹间信息链,发射后根据他弹传递来的剩余时间等信息进行相应控制调整;空间约束主要指角度约束,即让多弹分别以特定角度飞向目标以降低其逃逸概率<sup>[35]</sup>,另外还有学者探讨了多弹散布覆盖目标可达区的空间协同策略<sup>[36]</sup>。文献[37]提出了基于分割逼近的多弹同时协同区域覆盖优化算法和基于差商逼近的多弹分时协同时空覆盖优化算法,可用于计算拦截所需导弹数量及各弹间的时间/空间间隔,实现在目标位置信息误差较大条件下的高成功率拦截。在高超声速拦截控制律方面,当前研究多采用积分滑模控制、最优控制理论和改进的比例导引法<sup>[38-39]</sup>。

## 2.7 高效毁伤战斗部技术

为保证毁伤效果和降低战斗部重量,常规反导导弹多采用动能碰撞式战斗部,附加系留式或单、多环等杀伤增强装置来增大毁伤范围,当前美国的动能拦截技术最为先进,其拥有多型装备动能战斗部的反导导弹<sup>[40-41]</sup>。动能拦截技术的应用需要拦截弹具备足够高的制导精度,而由于高超声速目标具备强机动性,拦截弹的脱靶量和引信工作时机误差可能远大于常规反导场景。为解决此问题,可考虑进一步增大战斗部毁伤范围,相关学者提出了定向增强爆破、活性破片和分散阵列爆炸技术<sup>[42-43]</sup>。美国战略与国际研究中心发布的报告《复杂的防空:反制高音速导弹威胁》中还提出了粉尘弹、微波弹和模块化弹头等形式的反高超战斗部。

## 2.8 侧向直接力发动机技术

高超声速拦截弹的动力系统设计需要保证其具备足够的速度、过载以及姿态控制能力,多级发动机是一种较好的解决方案,其既可以保证充足的助推段动力,又可减轻末段重量以提高过载<sup>[44]</sup>。由于交战域位于空气稀薄的临近空间,空气动力较小,往往需装备侧向直接力发动机来增强拦截弹末段的姿轨控制能力<sup>[45]</sup>,美国的一些反导导弹,如“标准3”、“萨德”等都采用了该技术。侧向直接力发动机按燃料种类可分为固体和液体型,其中固体型由于具备能量体积比高、安全可靠、储存维护简单等优点,被广泛应用于导弹上。相比于常规固体火箭发动机,侧向直接力发动机需要多次启停,控制机构较为复杂,相关控制阀门也需具备较强的耐高温能力<sup>[46]</sup>。目前该种发动机的小型化、高可靠性技术需要进一步研究。

## 3 高超声速防御技术发展展望

### 3.1 远距探测平台与拦截弹技术

发展面向高超声速导弹的远距拦截能力是实现大范围国土防御和提高防御系统可靠性的重要途径,其重点在于新型探测系统和拦截弹的开发。装备红外和雷达传感器的低轨卫星组网可解决对高超声速目标的早期预警和跟踪探测问题,高空气球雷达平台也可以克服地球曲率带来的探测距离限制,这两类探测平台未来可能迎来快速发展。拦截弹方面,需进一步提高现有装备的射程和速度,由于远程拦截弹和高超声速武器有很多可共用的关键技术,如动力、防热、导引、控制等,美国、俄罗斯等国都具有足够的技术实力进行该类装备开发。

### 3.2 装备低成本化

成本对于高超声速防御甚至整个国家的作战能力都至关重要。随着高科技装备的发展,现代战争成本越来越高,长久的战争很容易拖垮一国经济。降低高超声速目标防御的探测、指控、打击等各环节的成本,才能采取更多增大拦截成功率的措施,如布置更多的探测器、采用多弹协同拦截战术等。装备低成本化主要从以下几个角度考虑,一是装备可回收技术,如运载火箭、多级导弹助推器的回收,降低装备使用成本;二是数字工程技术,

降低装备从设计论证到列装、退役全生命周期的成本；三是先进制造技术，如低成本、高质量增材制造，降低装备生产的时间和人力成本；四是新型材料/设计技术，降低现代化装备中高价电子器件的成本。

### 3.3 体系作战技术

在战场复杂度越来越高的今天，体系作战思想变得非常重要。美国空军在 2015 年发布的报告《空军未来作战概念》中已提出了在使用高超武器的同时，利用大规模无人机诱饵来饱和对手防御系统的设想。因此，未来的高超声速武器大概率不会被单独应用，相关防御技术研究也需要更多的从全局出发，考虑到对手的各类协同攻击手段，这需要持续开展外军装备情报调研、高超声速目标突防策略探索、复杂战场下的体系效能评估技术研究、先进精细化作战仿真推演技术研究等工作。

## 4 结束语

虽然高超声速武器具有独特优势，但防御并非不可实现。从美国国防预算可以看出，当前其最大防御重心仍在弹道导弹上，一方面因为高超声速导弹技术成熟度稍弱，尚未对其本土构成严重的“当下威胁”，另一方面高超声速武器大多不被作为洲际战略武器使用。尽管如此，高超声速防御仍然值得重视，其是未来战争中极为重要的一环，开发高超声速防御系统也是对现有导弹防御系统的升级。

### 参考文献：

- [1] Liu S X, Yan B B, Huang W, et al. Current Status and Prospects of Terminal Guidance Laws for Intercepting Hypersonic Vehicles in Near Space: A Review[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2023, 24(5): 387-403.
- [2] 高铭, 王健, 刘杰, 等. 俄“匕首”高超声速导弹首次实战使用分析与启示[J]. 战术导弹技术, 2022(6): 116-120.  
Gao Ming, Wang Jian, Liu Jie, et al. Analysis and Enlightenment of the First Combat Operation of Russian Kinzhal Hypersonic Missile[J]. Tactical Missile Technology, 2022(6): 116-120. (in Chinese)
- [3] 杨明映, 朱昱, 张笋. 防抗高超声速武器作战体系建设思考[J]. 飞航导弹, 2019(7): 21-25.  
Yang Mingying, Zhu Yu, Zhang Sun. Thoughts on the Construction of Combat System Against Hypersonic Weapons[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(7): 21-25. (in Chinese)
- [4] 曲智国, 林强, 费太勇, 等. 美国高超声速武器发展与防御[J]. 战术导弹技术, 2023(2): 39-45.  
Qu Zhiguo, Lin Qiang, Fei Taiyong, et al. Development and Defense of Hypersonic Weapons in the United States[J]. Tactical Missile Technology, 2023(2): 39-45. (in Chinese)
- [5] 刘双喜, 刘世俊, 李勇, 等. 国外高超声速飞行器及防御体系发展现状[J]. 空天防御, 2023, 6(3): 39-51.  
Liu Shuangxi, Liu Shijun, Li Yong, et al. Current Developments in Foreign Hypersonic Vehicles and Defense Systems[J]. Air & Space Defense, 2023, 6(3): 39-51. (in Chinese)
- [6] 李志淮, 郑建成, 朱刚, 等. 对抗高超声速武器的防御策略研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(8): 1-5.  
Li Zhihuai, Zheng Jiancheng, Zhu Gang, et al. Research on Defense Strategy of Countering Hypersonic Weapons[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(8): 1-5. (in Chinese)
- [7] 郑建成, 谭贤四, 曲智国, 等. 高超声速飞行器防御特征与趋势[J]. 战术导弹技术, 2022(2): 1-8.  
Zheng Jiancheng, Tan Xiansi, Qu Zhiguo, et al. Defense Characteristic and Tendency of Hypersonic Vehicle[J]. Tactical Missile Technology, 2022(2): 1-8. (in Chinese)
- [8] 王芳, 夏牟, 陈亮, 等. 俄罗斯反导系统的发展现状[J]. 航天电子对抗, 2022, 38(2): 53-58.  
Wang Fang, Xia Mou, Chen Liang, et al. Recent Development of Russian Anti-Missile System[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2022, 38(2): 53-58. (in Chinese)
- [9] 张文涛, 苏琪雅, 于沐尧. 国外防空反导系统现状与未来发展趋势[J]. 国防科技工业, 2023(1): 41-43.  
Zhang Wentao, Su Qiya, Yu Muyao. Present Situation and Future Development Trend of Foreign Air Defense and Anti-Missile Systems[J]. Defence Science & Technology Industry, 2023(1): 41-43. (in Chinese)
- [10] 张婵. S-500: 进一步提升俄空天防御能力[J]. 太空探索, 2021(10): 72-75.  
Zhang Chan. S-500: Further Improving Russia's Air and Space Defense Capability[J]. Space Exploration, 2021(10): 72-75. (in Chinese)
- [11] 惠仲阳, 范唯唯. 日本发布新版《宇宙基本计划》[J]. 空间科学学报, 2020, 40(6): 968.  
Xi Zhongyang, Fan Weiwei. Japan Released a New Version of the Basic Plan of the Universe[J]. Chinese Journal of Space Science, 2020, 40(6): 968. (in Chinese)
- [12] 祁圣君, 王锦锦, 王亚龙. 外军长航时无人机装备发展综述[J]. 飞航导弹, 2021(8): 61-67.  
Qi Shengjun, Wang Jinjin, Wang Yalong. Overview of the Development of UAV Equipment for Foreign Commanders' Endurance[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(8): 61-67. (in Chinese)
- [13] 栗硕. 起底日本自卫队反导作战实力[J]. 军事文摘, 2019(15): 12-15.  
Li Shuo. Starting from the Anti-Missile Combat Strength of the Japanese Self-Defense Forces[J]. Military Digest, 2019(15): 12-15. (in Chinese)
- [14] 熊瑛, 吕涛, 陈祎璠, 等. 2022 年国外导弹防御发展研究[J]. 战术导弹技术, 2023(2): 9-14.  
Xiong Ying, Lü Tao, Chen Yifan, et al. Overview of Foreign Missile Defense Development in 2022[J]. Tactical Missile Technology, 2023(2): 9-14. (in Chinese)
- [15] 曹洁, 高国柱. 高空气球的发展现状[J]. 科技视界, 2019(3): 183-184.  
Cao Jie, Gao Guozhu. Status of Development on High Altitude Balloon[J]. Science & Technology Vision, 2019(3): 183-184. (in Chinese)
- [16] 邓烈刚. 具有主动式识别与定位功能的激光无线充电技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021: 66.  
Deng Liegang. Research on Laser Wireless Charging with Active Recognition and Positioning Function[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021: 66.

- versity of Aeronautics and Astronautics, 2021: 66. (in Chinese)
- [17] 于哲峰, 陈旭明, 杨鹰, 等. 高超声速飞行器尾迹转捩及其对雷达散射截面的影响[J]. 兵工学报, 2019, 40(12): 2467 - 2472.  
Yu Zhefeng, Chen Xuming, Yang Ying, et al. Wake Transition of the Hypersonic Vehicle and Its Influence on RCS[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(12): 2467 - 2472. (in Chinese)
- [18] 沈方芳, 毛铮, 谢曜聪, 等. 等离子鞘套下空间高速目标逆合成孔径雷达距离像散焦补偿算法[J]. 宇航学报, 2023, 44(5): 785 - 795.  
Shen Fangfang, Mao Zheng, Xie Yaocong, et al. ISAR Range Profile Defocusing Compensation Algorithm for Space High Speed Target in Plasma Sheath[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(5): 785 - 795. (in Chinese)
- [19] 彭志刚, 李宝鹏, 李大龙. 基于 LMS 的多模型高机动目标跟踪方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(12): 111 - 114.  
Peng Zhigang, Li Baopeng, Li Dalong. A Multiple Model Tracking Filter Algorithm for Maneuvering Target Based on LMS[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(12): 111 - 114. (in Chinese)
- [20] 刘扬, 秦琨, 方明, 等. 反高超声速目标跟踪制导雷达及关键技术研究[J]. 软件, 2022, 43(3): 13 - 16.  
Liu Yang, Qin Kun, Fang Ming, et al. Research and Design on Key Technology of Anti Hypersonic Target Tracking Radar[J]. Software, 2022, 43(3): 13 - 16. (in Chinese)
- [21] Yi X, Li L. Research on Trajectory Prediction of Near Space Target Based on NAR Neural Network[C]//International Conference on Guidance, Navigation and Control, 2023: 6357 - 6367.
- [22] 郑建成, 曲智国, 谭贤四, 等. 反临与反导预警探测特征比较[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(2): 379 - 385.  
Zheng Jiancheng, Qu Zhiguo, Tan Xiansi, et al. Comparison of Early Warning Detection Characteristics between Anti - Near - Space and Anti - Missile[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(2): 379 - 385. (in Chinese)
- [23] 张宝玲, 薛俊诗, 李晓波. 一种高超声速机动目标双(多)基地雷达探测方法[J]. 遥测遥控, 2015, 36(3): 6 - 14.  
Zhang Baoling, Xue Junshi, Li Xiaobo. A Hypersonic Maneuvering Target Detection Algorithm with Bistatic(Multi - Static) Radar[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(3): 6 - 14. (in Chinese)
- [24] 石安华, 石卫波, 张志刚, 等. 红外卫星对通用高超滑翔导弹的可探测性分析[J]. 红外, 2021, 42(10): 1 - 8.  
Shi Anhua, Shi Weibo, Zhang Zhigang, et al. Analysis of Infrared Satellite's Detectability for Common Hypersonic Glide Body[J]. Infrared, 2021, 42(10): 1 - 8. (in Chinese)
- [25] 陈海龙, 张翱, 刘雪梅, 等. 低轨红外卫星对类 HTV - 2 高超声速飞行器探测能力研究[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 50 - 57.  
Chen Hailong, Zhang Ao, Liu Xuemei, et al. Research on Detection Capability of Low - Orbit Infrared Satellite to HTV - 2 - Like Hypersonic Vehicle[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 50 - 57. (in Chinese)
- [26] 王少平, 董受全, 刘亿, 等. 助推滑翔高超声速导弹红外辐射特性研究[J]. 战术导弹技术, 2020(5): 27 - 32.  
Wang Shaoping, Dong Shouquan, Liu Yi, et al. Research on Infrared Characteristics of Boost - Glide Hypersonic Missile[J]. Tactical Missile Technology, 2020(5): 27 - 32. (in Chinese)
- [27] 常勇, 薛丰廷. 地基红外探测系统的作用距离研究[J]. 红外, 2009, 30(8): 14 - 17.  
Chang Yong, Xue Fengting. Study of Detection Range of Ground - Based IR Detection System[J]. Infrared, 2009, 30(8): 14 - 17. (in Chinese)
- [28] 范晋祥, 侯文涛. 防空反导精确寻的末制导技术的发展与思考[J]. 空天防御, 2020, 3(3): 31 - 37.  
Fan Jinxiang, Hou Wentao. Development and Thinking of Precision Homing Terminal Guidance Technology for Air and Missile Defense[J]. Air & Space Defense, 2020, 3(3): 31 - 37. (in Chinese)
- [29] 李文杰, 闫世强, 胡磊, 等. 红外预警卫星系统虚警抑制技术综述[J]. 红外技术, 2020, 42(2): 115 - 120.  
Li Wenjie, Yan Shiqiang, Hu Lei, et al. A Review of False Alarm Suppression Technology for Infrared Early Warning Satellite System[J]. Infrared Technology, 2020, 42(2): 115 - 120. (in Chinese)
- [30] 郑彬. 基于表面微结构的高超声速飞行器减阻降温技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 96.  
Zheng Bin. Research on drag Reduction and Cooling Technology of Hypersonic Vehicles Based on Surface Micro - Structure[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 96. (in Chinese)
- [31] 洪延姬, 李倩, 方娟, 等. 激光等离子体减阻技术研究进展[J]. 航空学报, 2010, 31(1): 93 - 101.  
Hong Yanji, Li Qian, Fang Juan, et al. Advances in Study of Laser Plasma Drag Reduction Technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 93 - 101. (in Chinese)
- [32] 黄伟. 空间任务飞行器减阻防热新方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 192 - 195.  
Huang Wei. A New Method of Drag Reduction and Heat Protection for Space Mission Vehicle and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2021: 192 - 195. (in Chinese)
- [33] 易芳. 高超声速飞行器分时拦截信息处理问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 96.  
Yi Fang. Research on Information Processing in Asynchronous Interception of Hypersonic Aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 96. (in Chinese)
- [34] 刘艳斌. 多拦截弹目标分配及协同制导研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 81.  
Liu Yanbin. Target Assignment and Cooperative Guidance of Multiple Interceptors[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 81. (in Chinese)
- [35] 刘翔, 梁晓庚. 攻击角约束多拦截弹协同制导控制一体化研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(2): 273 - 282.  
Liu Xiang, Liang Xiaogeng. Integrated Guidance and Control of Multiple Interceptors with Impact Angle Constraints Considered[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(2): 273 - 282. (in Chinese)
- [36] 王鹏, 赵石磊, 陈万春, 等. 基于可达区在线预测的 GPI 中制导协同拦截策略[J/OL]. 北京航空航天大学学报, doi: 10.13700/j. bh. 1001 - 5965. 2022. 0856.  
Wang Peng, Zhao Shilei, Chen Wanchun, et al. Cooperative Interception Strategy for the Midcourse Guidance of GPI based on the

- Online Prediction of Reachable Area[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0856. (in Chinese).
- [37] 王龙. 基于区域覆盖的多飞行器协同拦截优化设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
Wang Long. Study on Optimization and Design Approach for Multiple Flight Vehicles Cooperative Interception Based on Area Coverage[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [38] Zhou J, Lei H M. Coverage - Based Cooperative Target Acquisition for Hypersonic Interceptions[J]. Science China: Technological Sciences, 2018, 61(10): 1575 - 1587.
- [39] 于志鹏, 陈刚, 李跃明. 反吸气式临近空间飞行器空基拦截弹制导律设计[J]. 飞行力学, 2017, 35(1): 66 - 69.  
Yu Zhipeng, Chen Gang, Li Yueming. Design of Air - Based Interceptor's Guidance Law for Airbreathing Hypersonic Vehicle in Near Space[J]. Flight Dynamics, 2017, 35(1): 66 - 69. (in Chinese)
- [40] 朱枫, 韩晓明, 何小九. 新型反战术弹道导弹拦截杀伤技术: 直接碰撞动能杀伤[J]. 飞航导弹, 2017(2): 3 - 9.  
Zhu Feng, Han Xiaoming, He Xiaojiu. A New Anti - Tactical Ballistic Missile Interception and Killing Technology—Direct Collision Kinetic Energy Killing[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(2): 3 - 9. (in Chinese)
- [41] 赵超越, 梁争峰. 动能拦截杀伤增强装置技术研究进展[J]. 飞航导弹, 2017(12): 45 - 48.  
Zhao Chaoyue, Liang Zhengfeng. Research Progress of Kinetic Energy Interception and Killing Enhancement Device Technology [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(12): 45 - 48. (in Chinese)
- [42] 胡宏伟, 肖川. 阵列爆炸: 一种常规高效毁伤技术[J]. 含能材料, 2019, 27(9): 717 - 719.  
Hu Hongwei, Xiao Chuan. Array Explosion—A Conventional High Efficiency Damage Technology[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(9): 717 - 719. (in Chinese)
- [43] 赵玉杰, 杨晨, 宋琛. 空基高超声速导弹防御系统关键技术研究[J]. 战术导弹技术, 2020(4): 64 - 70.  
Zhao Yujie, Yang Chen, Song Chen. Research on the Key Technologies of Air - Based Hypersonic Missile Defense System[J]. Tactical Missile Technology, 2020(4): 64 - 70. (in Chinese)
- [44] 侯佳, 韩洪伟. 高超声速巡航导弹武器防御[J]. 国防科技, 2019, 40(6): 114 - 116.  
Hou Jia, Han Hongwei. Defense of Hypersonic Cruise Missile [J]. National Defense Technology, 2019, 40(6): 114 - 116. (in Chinese)
- [45] 武文峰, 靳凌, 周桃品. 临近空间高超声速目标防御制导策略研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(3): 68 - 72.  
Wu Wenfeng, Jin Ling, Zhou Taopin. Research on Defense and Guidance Strategy of Hypersonic Target in Near - Space [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(3): 68 - 72. (in Chinese)
- [46] 侯晓, 付鹏, 武渊. 固体火箭发动机能量管理技术及其新进展[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(1): 1 - 6.  
Hou Xiao, Fu Peng, Wu Yuan. Energy Management Technology of SRM and Its Development[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2017, 40(1): 1 - 6. (in Chinese)

## Analysis of the Development and Key Technologies of Hypersonic Defense Capability in Foreign Countries

Wang Enliang<sup>1,2</sup>, Yuan Cheng<sup>1,2\*</sup>, Zhao Yujie<sup>1,2</sup>, Gao Shuliang<sup>1,2</sup>

(1. Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** With the rapid development and application in practical battlefields of hypersonic weapons, the demand for hypersonic defense technologies has become increasingly urgent in various countries. Due to the different target characteristics of hypersonic weapons from traditional missiles, existing missile defense systems are difficult to achieve good interception effects, and related equipment and technologies need to be redeveloped. In order to sort out the future demand directions of hypersonic defense technologies, this paper summarized the current status of hypersonic defense capabilities in countries such as the United States, Russia, and Japan from the aspects of early warning detection, interception and strike and so on, and analyzed relevant key technologies. It is proposed that future hypersonic defense should focus on increasing interception distance, reducing combat costs, and dealing with system attack.

**Key words:** hypersonic; defense; anti near space; interception; detection