航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Jun. 15 2018 Vol. 29 No.06 01-06

临近空间高超声速武器发展趋势

田宏亮 *
中国空空导弹研究院，河南 洛阳 471009

摘　要：首先介绍了临近空间高超声速武器研究的历程，然后重点分析了当前军事强国临近空间高超声速武器的发展思路和正在进行的项目。根据目前高超声速武器的现状，着重剖析了其关键技术。最后，对高超声速武器的未来发展前景及其战略意义进行了展望。

关键词：临近空间；高超声速武器；发展趋势；关键技术

中图分类号：TJ760　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.06.001

20 世纪 50 年代中期，高超声速飞行器发展的第一个高峰是以美国超声速燃烧试验的成功以及超燃冲压发动机概念的提出为标志。1986 年，以美国开始国家空天飞机计划（NASP）为标志，高超声速飞行器发展进入了一个新的研究高潮。《国防部高超声速计划路线图》是 2008 年 2 月美国国防部向美国国会递交的，如图 1 所示。该计划包括采用火箭发动机和组合发动机技术、吸气式高超声速巡航技术。2011 年，美国空军公布了《美国空军科学与技术工程评估》高速武器发展路线图，如图 2 所示。2008—2013 年，美国的高超声速飞行器试飞多用于验证布局与推进技术。2016 年 3 月，美国空军联合会的米切尔空天研究所发表《高超声速武器与美国国家利益：21 世纪的突破》，该报告认定为打击 / 持久作战能力、空中优势 / 防御能力和快速进入太空能力是美军的高超声速计划的目的[1,2]。

相比之下，俄罗斯临近空间高超声速飞行器计划方案都采用了技术成熟的飞机和导弹作为发射平台或者改造成为试验飞行器，成本低廉，技术风险小。图 3 为俄罗斯临近空间高超声速计划发展历程。此外，德国、法国、英国、印度、澳大利亚、日本和韩国等国家都开展了自己的超高声速计划。

本文介绍临近空间高超声速武器研究领域的发展趋势，重点分析美军的临近空间高超声速武器的发展思路和正在进行的项目。

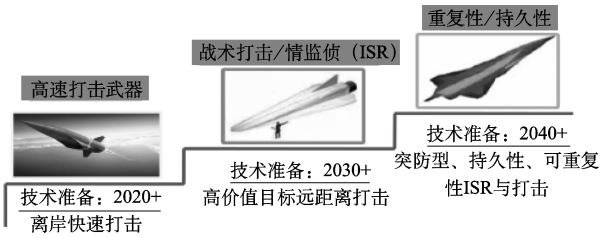

图 1　美国国防部 2008 年高超声速计划路线图
Fig.1　2008 road map for hypersonic plans of United States Department of Defense

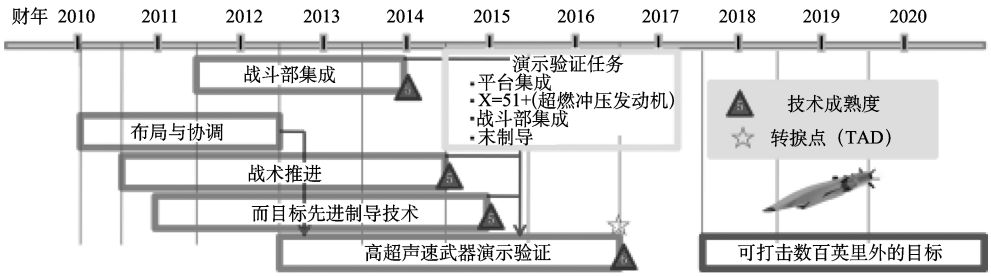

图 2　美国空军 2011 年高速武器路线图
Fig.2　2011 road map for hypersonic plans of United States Air Force

收稿日期：2018-01-29；　退修日期：2018-03-29；　录用日期：2018-05-25
基金项目：航空科学基金（2016ZC12009）
* 通信作者 . Tel.：18603793683　E-mail：thlnhy666@163.com
引用格式：Tian Hongliang. Development trends of near space hypersonic weapon[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (06)：01-06. 田宏亮 . 临近空间高超声速武器发展趋势 [J]. 航空科学技术，2018, 29 (06)：01-06.

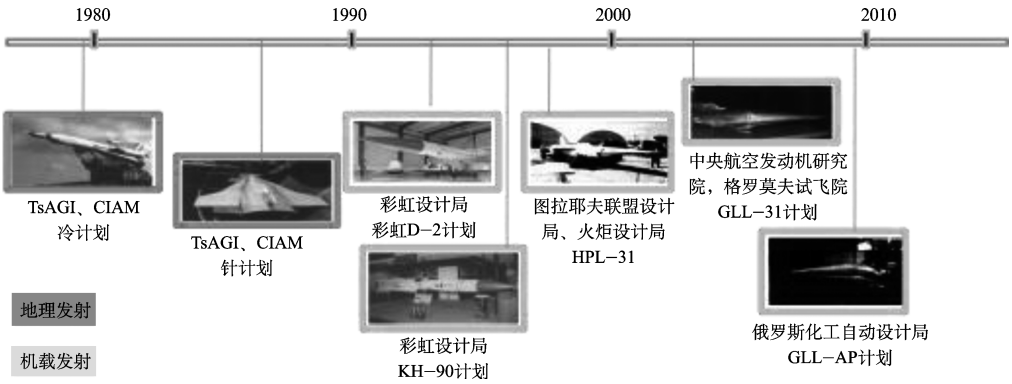

图 3 俄罗斯临近空间高超声速计划发展历程

Fig.3 The development course of near space hypersonic plans in the Russia

1 最新项目进展

目前在研的机载高超声速武器主要包括美国的战术助推滑翔（TBG）项目、高超声速吸气式武器概念（HAWC）项目、先进高超声速武器（AHW）项目，俄罗斯的“锆石”高超声速导弹和 YU-71 高超声速助推滑翔导弹目前虽然并非空射型，但在后续改进型中已经计划发展空射型[3~6]。

1.1 战术助推滑翔项目（TBG）

TBG 项目于 2014 年启动，由美国国防预先研究计划局（DARPA）和美国空军联合实施，旨在集成验证战术级空射高超声速助推滑翔导弹的关键技术，主要包括大包线气动力 / 热设计技术、高裕度低成本热结构 / 材料设计与制造技术、鲁棒自适应制导导航与控制技术、先进热 / 力 / 大气等飞行测试技术和高速导引头技术等。

TBG 项目可视为 HTV-2 项目（主要承包商为洛克希德 - 马丁公司，简称洛马）的后继项目，目标是在 HTV-2 的基础上将高升阻比气动外壳和热防护按比例缩小，把速度和射程等关键指标降低，使其成为空射或舰射的战术级武器，如图 4 所示。

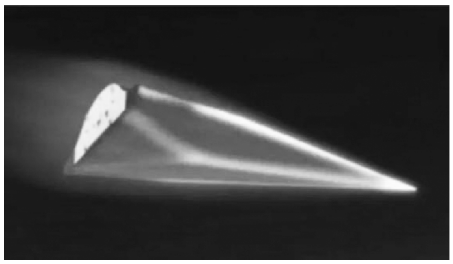

图 4 TBG 项目导弹概念想象图

Fig.4 The missile conceptual envisagement of TBG project

2014—2015 年，主要开展作战概念、导弹概念、演示验证方案等顶层研究和总体方案论证，授予洛马公司、雷神公司和波音公司各一份合同。2015—2016 年，主要开展方案初步设计，分别授予洛马公司和雷神公司价值 2000 万美元和 2400 万美元的合同。2016 年 9 月，金额 1.47 亿美元的第三阶段合同被 DARPA 授予给洛马公司。合同内容是研制 TBG 原型弹，要求 2018 年首飞。

1.2 高超声速吸气式武器概念项目（HAWC）

HAWC 项目于 2013 年正式确立，目前由 DARPA 和空军研究实验室（AFRL）共同实施，如图 5 所示。HAWC 项目已经在 2016 年第一季度完成初始设计评审，可推测在第二阶段合同授予之前完成初始设计评审（PDR），2016 年开始飞行演示验证器的设计，并于 2017 年完成关键技术设计评审（CDR），2017 年第四季度完成演示验证器硬件的合格测试，第二阶段用时可能会少于前期规划。

图 5 HAWC 项目导弹概念想象图

Fig.5 The missile conceptual envisagement of HAWC project

1.3 先进高超声速武器（AHW）

2011 年 11 月 17 日，美国陆军航天与导弹防御司令部和陆军战略司令部进行了“先进高超声速武器”（AHW）的首次飞行试验，飞行 3900km，如图 6 所示。2015 年美国海军与国家 CPGS 团队合作完成了海基 AHW 首个试飞器 FE-1 的初始设计评审，并开始对 FE-1 进行组装以及系统级试验与评估。2017 年 10 月 30 日，FE-1 进行了飞

图 6 AHW 飞行器

Fig.6 AHW aircraft

行试验，发射点位于夏威夷考艾岛太平洋导弹试验场，导弹落点为马绍尔群岛夸贾林环礁里根试验场，全程飞行约3700km，飞行时间不足30min。在关键技术攻关方面，美国国家CPGS团队正在持续加紧开展助推器、载荷投送飞行器、非核战斗部、热防护系统、制导系统以及任务规划等关键分系统的技术成熟和风险降低。

1.4 3K-22“锆石”高超声速导弹

锆石高超声速导弹由俄罗斯战术导弹集团下属的俄罗斯机械制造科研生产联合体负责研制，项目启动时间可以追溯到2011年，其出口版本正是俄罗斯和印度联合研制的布拉莫斯-2高超声速巡航导弹，如图7所示。2017年4月，锆石高超声速巡航导弹完成了最新一次试射，导弹飞行速度达到马赫数*Ma*8，俄罗斯“彼得大帝”号核动力巡洋舰和基洛夫级“纳克西莫夫海军上将”号核动力导弹巡洋舰未来都可以装备该导弹，潜射型和空射型后续也将发展。

图7 “锆石”高超声速导弹的出口型
Fig.7 The export-oriented Zicron hypersonic missile

1.5 Yu-71高超声速助推滑翔导弹

2007年之后，苏联著名导弹设计局——机械制造科研生产联合体（NPOMash）出版物和俄罗斯相关政府文件都将该高超声速滑翔飞行器相关的活动用4202项目指代；并对滑翔器及其相关系统进行了升级改进，新的滑翔飞行器被称作Yu-71，如图8所示。2011年12月27日，4202项目的Yu-71

图8 Yu-71飞行器
Fig.8 Yu-71 aircraft

高超声速滑翔器作为SS-19导弹飞行试验的一部分在拜科努尔靶场进行了第一次试验。2016年4月19日，Yu-71进行了唯一的一次完全成功的试验（第五次发射试验）。

RS-28“萨尔马特”导弹可以安装Yu-71作为弹头，未来的PAK-DA远程战略轰炸机上也可以装备Yu-71。

2 关键技术发展情况

2015年5月，为了推进高速打击武器（HSSW）项目，美国空军研究实验室发布了《高速打击武器技术成熟项目》，该项目是推动高超声速技术向武器化发展的关键项目[7~12]。高超声速飞行器的特点包括非线性（即模型结构非线性、模型参数非线性和约束条件非线性）、强耦合（即机体发动机一体化设计、流固耦合、弹性体与刚体间的耦合和通道耦合）、快时变（即大空域飞行引起的时变、高超声速流引起的时变和质量变化引起的时变）和不确定（即未建模动态引起的不确定、数据稀缺引起的不确定、弹性变形引起的不确定和随机干扰引起的不确定）。

（1）高超声速动力推进技术

研究目标是评估并开发推进技术，确保武器速度进一步提高并达到作战效能。研究内容是冲压发动机/超燃冲压发动机、助推器、燃料、进气道、尾喷管以及可模拟推进系统气动效应的预测模型等。

（2）高超声速导弹引战技术

研究目标是开发满足在巡航/滑翔/末段俯冲阶段极端高热和振动环境下特定作战需求的引战系统，比常规导弹的引战系统小，对战斗部装药的能量密度以及能量传输效率要求更高。研究内容是引信功能性、高温装药配方、共形引战包、战斗部外壳功能性、鲁棒战斗部杀伤性以及引战系统一体化集成等。

（3）高超声速导弹材料、结构与制造技术

研究目标是评估并开发可用于高速武器方案、能适应高速长时飞行的材料，能保护机身结构的完整性，确保系统和分系统正常工作。研究内容是可传输射频、光电、红外信号的头罩和窗口材料、适应射程增加且具有较好耐受能力的耐高温轻质材料、先进制造工艺技术等。

（4）总体设计和系统集成技术

研究目标是开发系统/分系统层次的总体方案，以增强下一代空射武器的作战效能。研究内容是武器搭载平台集成、武器系统后勤保障、紧凑式挂机技术、鲁棒弹体设计、可维护性及系统安全等。

（5）高超声速导弹制导与控制技术

研究目标是开发满足最大射程、最小飞行时间和最小脱靶量要求的制导方式；稳定性好，能适应GPS降效/完全失效等环境；自适应性强，可在整个飞行弹道内控制弹

体变形。研究内容是大气数据传感器、数据链、优化制导律、鲁棒 / 自适应自动驾驶仪、导引头 / 传感器技术等技术。

(6) 高超声速武器试验测试技术

长期以来，在高超声速技术开发中，美国国家航空航天局 (NASA)、国防部及工业界一直未形成统一协同的国家团队。因此，根据试验资源管理中心 (TRMC) 于 2012 年发布的《试验与鉴定基础设施全面评估》报告，美国国防部在当前已有和在建的地面试验设施中，确定了 16 处核心试验设施 (见图 9 和表 1)

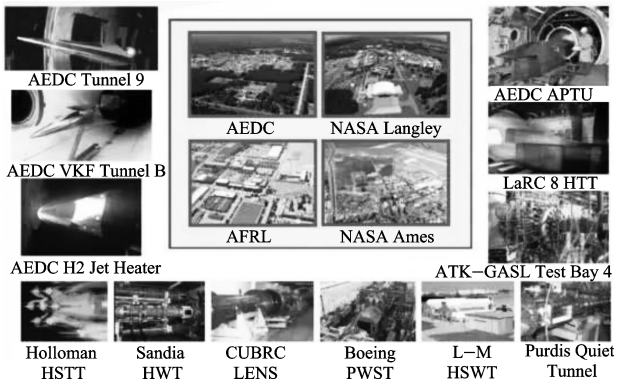

图 9 美国国防部当前重点确保的高超声速地面试验中心及设施

Fig.9 Focus on ensuring the facilities and ground test center of hypersonic vehicle by DoD

表 1 美国 TRMC 确认的 16 处高超声速核心试验设施

Table 1 The sixteen hypersonic core test facilities by U.S.TRMC

设施类别	设施运营管理机构	设施名称
总体与气动试验风洞	空军阿诺德工程发展中心 (AEDC)	冯 - 卡门气动设施 (VKF) A/B/C 风洞
	空军 AEDC	9 号风洞
	NASA 兰利研究中心	31in *Ma*10 风洞 20in *Ma*6 风洞 15in *Ma*6 风洞
	能源部桑迪亚国家实验室 (SNL)	高超声速风洞 (HET) *Ma* 5, 8, 14
	卡尔斯藩大学巴佛罗研究中心 (CUBRC)	大能量国家激波 (LENS) 风洞：LENS-1，LENS-2，LENS-XX
	普渡大学	静音风洞
气动热风洞 (电弧)	空军 AEDC	H1，H2，H3
	NASA 艾米斯研究中心	电弧喷流设施
推进试验风洞	NASA 兰利研究中心	8ft 高温风洞 (HTT)
	国防部 TRMC	高超声速气动推进洁净空气试验台 (HAPCAT)
	空军 AEDC	气动与推进试验单元 (APTU)
	空军研究实验室	单元 18、19、22
	NASA ATK	GASL4 号试验舱
其他	空军 AEDC	气动弹道靶场 G
	霍洛罗空军基地	高速试验轨道 (火箭橇)
	能源部桑迪亚国家实验室	太阳能阵列

注：1in=25.4mm；1ft=0.3048m。

和三处重点试验设施。三处重要试验设施包括波音公司多声速风洞 (PWST)、洛马公司高速风洞 (HSWT) 以及 AFRL 激光加固材料评估实验室 (LHMEL)。

美国通过评估的手段，提出了按照“三步并行”的方法来建立高超声速技术领域试验与鉴定能力。这“三步”具体包括充分利用现有设施能力、采用当前商用货架技术升级现有设施能力和投资开发先进试验技术以满足未来武器系统开发需求。

高速系统试验 (HSST) 项目主要开发、验证并转化技术工具和方法，以对高速系统进行及时有效的试验和鉴定。HSST 项目设置了先进推进、气动力与气动热、计算工具、测量仪器以及飞行试验与鉴定等 5 个子领域。2015 年 7 月，阿诺德工程发展中心 (AEDC) 公布了 HSST 项目针对吸气式高超声速巡航导弹和助推 - 滑翔武器的试验与鉴定目标，包括 33 个关键试验与鉴定目标和 25 个试验与鉴定需求，如图 10 和图 11 所示。

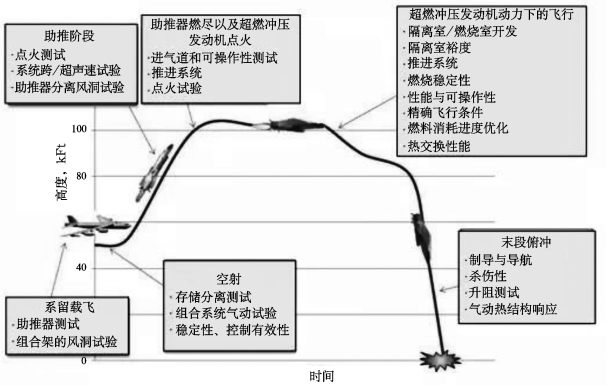

图 10 高超声速巡航导弹试验与鉴定目标

Fig.10 The targets of experiment and identification of hypersonic cruise missile

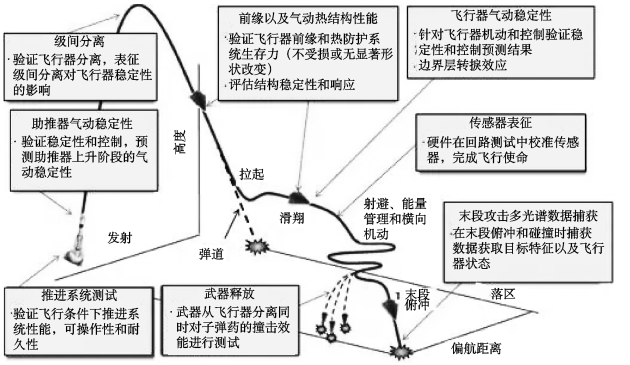

图 11 助推滑翔打击武器试验与鉴定目标

Fig.11 The targets of experiment and identification of boost-glide strike weapon

3 国外发展趋势与战略意义

3.1 发展趋势

在高超声速试飞活动频度方面，美国、中国、俄罗斯相

差不大，但中国和俄罗斯的试飞主要集中在近年。据美国《航空周刊》报道，中国在 2014—2016 年间累计进行了 7 次试飞；在 2011—2016 年，俄罗斯共进行了 7 次高超声速飞行器试飞（Yu-71/74 6 次试飞、“锆石”一次试飞）。在 2009—2014 年，美国共进行了 8 次高超声速试飞活动（HTV-2 两次试飞、AHW 两次试飞）。

美国空军官网称，2017 年 5 月 3 日，空军高层领导出席商讨加快高超声速技术研究和进展的会议。“美国国防部军兵种在高超声速武器研发中展现更多领导力，而不是将此角色交由研究机构 DARPA”这个关键的意见极有可能在后续项目中得到更好的体现。美国高超声速装备发展将进入快车道。

目前，美国多位空军研究实验室领导人和首席科学家先后提出的 21 世纪 20 年代研制出高超声速导弹、30 年代研制出有限重复使用的高超声速飞机、40 年代研制出多次重复使用的高超声速飞机这一高超声速路线。美国很可能提升启动高超声速武器采办程序的速度，并完成型号立项。

俄媒体多次报道称，2020—2025 年俄罗斯将有一定规模的高超声速助推滑翔导弹装备部队，“锆石”高超声速巡航导弹将在 2022 年装备部队。

3.2 战略意义

美国科学院在 2016 年的报告中曾明确指出，目前不存在某项或某几项特定装备或技术能够有效防御高超声速武器，对高超声速武器防御的最好措施是对等发展本国的高超声速武器。

在尚没有能成功拦截高超声速武器的有效手段情况下，攻击与防御的技术平衡被打破，战争中被动防御的一方几乎没有胜利的可能。在高超声速武器时代，装备技术、装备体系、作战理论、战略战术、指挥艺术等都必须改变。因此，临近空间高超声速武器作为一种“改变战争规则”的新型武器，对未来国家空天安全形成重大威胁。高超声速武器“速度隐身”，弹道不确定，突防能力强，主要用于对作战体系内关键节点进行点打击，达到使敌方作战体系失效的目的，从而实现以战术手段打击敌方的战略要点，摧毁或削弱敌方的战略攻击和防御能力。

敌方高超声速杀伤链上的关键节点将成为优先打击目标，如高超声速武器发射平台、通信与侦察卫星、无人侦察机、数据链系统等，而军政首脑、指挥系统、雷达站、防空导弹阵地等传统的优先打击目标将不一定成为第一波被打击对象。

全球高超声速打击系统，使远离本土的前沿部署的必要性打了折扣，使作战空域大大扩大，空天一体不可避免。

4 结论

本文基于临近空间高超声速飞行器研究的发展历程，重点分析了临近空间高超声速武器的发展思路和正在进行的项目；然后重点剖析了高超声速武器的关键技术；最后指出，当前各类临近空间高超声速飞行器等空天作战平台和武器正在从关键技术攻关与演示验证阶段逐步转到装备采办和型号研制阶段，情报信息、指挥控制、火力打击等各种作战手段在临近空间逐步发展，使得由空到天过渡和结合的临近空间成为未来一体化作战的重要领域，临近空间高超声速武器具有上可对天、中可对临、下可对空对地的攻防优势，在未来的制空、制天权争夺中将具有超核心作用。 AST

参考文献

[1] 梁晓庚，田宏亮 . 临近空间高超声速飞行器发展现状及其防御问题分析 [J]. 航空兵器，2016（4）：3-10.
Liang Xiaogeng，Tian Hongliang. Analysis of the development status and the defense problem of near space hypersonic vehicle[J]. Aero Weaponry，2016（4）：3-10.（in Chinese）

[2] 刘杨，李继勇，赵明.国外高超声速武器技术路线分析及启示 [J]. 战术导弹技术，2015（5）：47-50.
Liu Yang，Li Jiyong，Zhao Ming. Technical route analysis and inspiration of foreign hypersonic weapons[J].Tactical Missile Technology，2015（5）：47-50.（in Chinese）

[3] 姜鹏，匡宇，谢小平，等 . 外高超声速飞行器研究现状及发展趋势 [J]. 飞航导弹，2017（7）：19-24.
Jiang Peng，Kuang Yu，Xie Xiaoping，et al. Research status and development trends of foreign hypersonic aircraft[J]. Aerodynamic Missile，2017（7）：19-24.（in Chinese）

[4] 廖孟豪 . 美国未来高超声速打击武器体系初露端倪 [J]. 飞航导弹，2015（1）：35-37.
Liao Menghao. Primary status of future hypersonic strike weapon system in the U.S.[J]. Aerodynamic Missile，2015（1）：35-37.（in Chinese）

[5] 胡冬冬，高小明，张绍芳，等 . 2016 年国外高超声速飞行器技术发展综述 [J]. 战术导弹技术，2017（1）：28-33.
Hu Dongdong，Gao Xiaoming，Zhang Shaofang，et al. Review of hypersonic technoloies progresses abroad in 2016[J]. Tactical Missile Technology，2017（1）：28-33.（in Chinese）

[6] 张绍芳，武坤林，张洪娜 . 俄罗斯助推滑翔高超声速飞行器发展 [J]. 飞航导弹，2016（3）：20-22.
Zhang Shaofang，Wu Kunlin，Zhang Hongna. The development

of down-pressuring hypersonic aircraft in russian[J]. Aerodynamic Missile, 2016 (3): 20-22. (in Chinese)

[7] 胡冬冬,牛文,李文杰,等 . 美国高超声速地面试验设施建设现状及能力提升举措分析 [J]. 飞航导弹, 2015 (9): 3-9.
Hu Dongdong, Niu Wen, Li Wenjie, et al. Analyses of construction status and initatives of capacity enhancement of hypersonic ground experiment facilities in the U.S. [J]. Aerodynamic Missile, 2015 (9): 3-9. (in Chinese)

[8] 胡冬冬,叶蕾 . 从高速系统试验 (HSST) 项目看美国高超声速试验科学技术专项实施现状 [J]. 飞航导弹, 2016 (4): 22-27.
Hu Dongdong, Ye Lei. Present situation of science & technology special program about hypersonic experiment based on HSST program in the U.S. [J]. Aerodynamic Missile, 2016 (4): 22-27. (in Chinese)

[9] 胡冬冬,叶蕾 . 美国加速高超声速打击武器实用化发展进程 [J]. 飞航导弹, 2016 (3): 15-19.
Hu Dongdong, Ye Lei. The deleloping process of the acceleration practicality of hypersonic strike weapons[J]. Aerodynamic Missile, 2016 (3): 15-19. (in Chinese)

[10] 战培国 . 美国陆军先进高超声速武器气动问题分析 [J]. 航空科学技术, 2015, 26 (01): 07-11.
Zhan Peiguo. Aerodynamic analysis of U.S. army advanced hypersonic weapon[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26 (01): 07-11. (in Chinese)

[11] 田宏亮, 许晓艳 . 视场受限制导与控制一体化设计 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (05): 67-73.
Tian Hongliang, Xu Xiaoyan. The integrated design method of guidance and control with field view constraints[J].Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (05): 67-73. (in Chinese)

[12] 田宏亮,许晓艳 . 动能拦截弹三维末制导律设计 [J]. 航空兵器, 2017 (04): 21-25.
Tian Hongliang, Xu Xiaoyan. The design for 3D guidance law of kinetic energy interceptor [J].Aero Weaponry, 2017 (04): 21-25. (in Chinese)

作者简介

田宏亮 (1972-) 男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞行器设计。

Tel: 18603793683 E-mail: thlnhy666@163.com

Development Trends of Near Space Hypersonic Weapon

Tian Hongliang*

China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China

Abstract: The course of researches on near space hypersonic weapon was presented firstly. Secondly, the most analysis was aimed at the idea of world's powerful nations about the development of near space hypersonic weapon and the near space hypersonic weapon items of world's powerful nations which is being developed. Thirdly, key techniques of near space hypersonic weapon was analyzed particularly based on their development status. Finally, the development trends and stratagem significance of hypersonic weapon was suggested.

Key Words: near space; hypersonic weapon; development trends; key technology

Received: 2018-01-29; **Revised:** 2018-03-29; **Accepted:** 2018-05-25

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2016ZC12009)

***Corresponding author.Tel.:** 18603793683 **E-mail:** thlnhy666@163.com