

6-20-2024

## Analysis on development trend of global hypersonic technology

Xiaorong HUANG

National Science Library (Chengdu), Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China,  
huangxiaorong@clas.ac.cn

*See next page for additional authors*

### Recommended Citation

HUANG, Xiaorong; CHEN, Yunwei; and ZHOU, Haichen (2024) "Analysis on development trend of global hypersonic technology," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. 39 : Iss. 6 , Article 14.

DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20240204001>

Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol39/iss6/14>

This Information & Observation is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact [lcyang@cashq.ac.cn](mailto:lcyang@cashq.ac.cn), [yjwen@cashq.ac.cn](mailto:yjwen@cashq.ac.cn).



---

## Analysis on development trend of global hypersonic technology

### Abstract

Hypersonic technology is a key technology in the aerospace field in the future and is of very important strategic and forward-looking significance. Using bibliometric methods, it is found that research on hypersonic technology is mainly concentrated in the military field, among which power propulsion technology, navigation guidance and control technology, thermal protection technology and new materials are important research directions in this field. After sorting out the research and development situation of various countries, it is found that the relevant core technologies related to the development of hypersonic weapons are still the focus of future research. At the same time, accelerating the deployment of hypersonic defense systems and strengthening cooperation with partner countries in technology research and development, joint air defense and missile defense to enhance regional defense and deterrence are also priorities for future deployment of countries.

### Keywords

hypersonic technology; hypersonic weapon; power propulsion technology; navigation guidance and control technology; new material and thermal protection technology; hypersonic wind tunnel; hypersonic defense system

### Authors

Xiaorong HUANG, Yunwei CHEN, and Haichen ZHOU

引用格式: 黄小容, 陈云伟, 周海晨. 全球高超声速技术发展态势分析. 中国科学院院刊, 2024, 39(6): 1106-1120, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240204001.

Huang X R, Chen Y W, Zhou H C. Analysis on development trend of global hypersonic technology. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(6): 1106-1120, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240204001. (in Chinese)

# 全球高超声速技术发展态势分析

黄小容<sup>1</sup> 陈云伟<sup>1,2\*</sup> 周海晨<sup>1</sup>

1 中国科学院成都文献情报中心 成都 610299

2 中国科学院大学 经济与管理学院信息资源管理系 北京 100190

**摘要** 高超声速技术是未来航空航天领域的制高点, 具有重要的战略性和前瞻性意义。文章采用文献计量/综述、国内外官方机构/权威网站调研等方法对全球高超声速技术发展态势进行分析。研究发现, 针对高超声速技术的研究主要集中在军事领域, 其中动力推进技术、制导与控制技术、新型材料和热防护技术等是该领域的研究重点方向。通过梳理各国研发态势发现, 未来涉及高超声速武器研发的相关核心技术仍是研究的重点, 同时各国正加快优先布局高超声速防御系统, 加强与合作国在技术研发、联合防空和导弹防御等方面的合作, 以提升地区防御力和威慑力。

**关键词** 高超声速技术, 高超声速武器, 动力推进技术, 制导与控制技术, 新型材料和热防护技术, 高超声速风洞, 高超声速防御系统

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20240204001

CSTR 32128.14.CASbulletin.20240204001

## 1 高超声速的概念及发展历程

### 1.1 概念

高超声速 (hypersonic) 是指超过声速5倍的飞行速度, 通常表示为5马赫及以上的速度<sup>[1]</sup>。早在20世纪初期, 美国、德国、苏联 (俄罗斯) 等国家就开始

对高超声速技术领域开展相关研究。钱学森 (Tsien)<sup>[2]</sup>于1946年首次提出高超声速概念。

### 1.2 早期发展历程

奥地利工程师 Sängner<sup>[3]</sup>提出了一种可重复使用、以火箭为动力的太空飞机“银鸟”概念 (飞行速度10马赫), 并在1933年将该技术路线完善为基于液体燃

\*通信作者

资助项目: 中国科学院成都文献情报中心创新基金创新业务平台项目 (E3Z0000101)

修改稿收到日期: 2024年5月31日

料火箭发动机、可水平起降、飞行速度可达13马赫的滑翔机；1944年，Sänger又提出了一个由火箭发动机提供动力的轰炸机项目<sup>[4]</sup>，相关概念和构思为后续高超声速飞行器的发展提供了指导。

20世纪40年代初期，德国曾计划建造一个用于模拟7—10马赫的高超声速风洞，但后因故中止<sup>[5]</sup>。1949年，美国通过V-2火箭首次实现了高超声速飞行<sup>①</sup>；1957年，美国阿诺德工程开发中心建造了一个高超声速风洞，并于1960年成功测试了由美国国家航空航天局（NASA）研制的火箭动力试验飞行器X-15的7马赫数飞行，这也是第一架实现高超声速飞行的飞机<sup>②</sup>。20世纪90年代中期，美国空军科学顾问委员会确定了高超声速的4个关键概念——导弹、机动再入飞行器、快速反应/全球飞行器系统和太空发射/支持系统；涉及的核心研究方向有空气热力学、推进系统和燃料（碳氢化合物和液态氢）、结构和材料等<sup>[6]</sup>。

### 1.3 主要国家研发动态

高超声速技术具有两用特性，可用于太空发射、航天器回收及客货运输等非军事领域，以及作为高超声速武器被应用到军事领域<sup>[7]</sup>。

在军事领域，高超声速技术将增强端到端的精准打击能力，以高超声速发射的高机动性武器几乎可以躲避当前使用的任何防御系统，使快速反应和全球攻击成为可能。高超声速武器具备超高速、高毁伤、高突防能力等特点，已成为大国空天军事竞争的战略制

高点<sup>[8]</sup>。近年来，世界各国不断深入探索、积极部署高超声速技术，并已取得相应成果。例如，美国海陆空军都在积极研发高超声速导弹，通过制定高超声速导弹加速计划，大幅增加支持和资金，以帮助开发、测试高超声速武器，并创建部署该武器的部队<sup>[9]</sup>；俄罗斯已经拥有“先锋”“锆石”“匕首”3款海陆空高超声速武器<sup>[8]</sup>；2020年，印度国防研究与发展组织宣布其自主研发的高超声速技术示范飞行器试验成功<sup>[10]</sup>；2023年，法国成功测试V-MaX高超声速导弹，其成为欧洲首个掌握高超声速技术的国家<sup>③</sup>；中国也在积极研发部署高超声速巡航导弹和高超声速滑翔飞行器，同时注重开发具有军事和民用应用的长程、可重复使用的高超声速实验平台。

高超声速技术在民用航空领域的应用尚不成熟，大部分研究仍处于研发或试验阶段。例如，2018年美国波音公司推出了高超声速客机的概念及相关技术方案<sup>④</sup>；美国的Hermeus和Stratolaunch公司及澳大利亚的Hypersonix公司正在积极研发以5马赫以上速度飞行的高超声速无人驾驶飞机，并计划开展相关飞行测试<sup>⑤</sup>。英国Aerion公司正在研发全电及混合电力推进的高超声速民用飞机<sup>⑥</sup>。欧盟委员会资助的StratoFly项目，设计了一架飞行速度在4—8马赫、低噪音的氢燃料高超声速飞行器（StratoFly MR3）<sup>[11]</sup>。俄罗斯正在研发一款以液态氢燃料为动力、速度达15马赫、可全球飞行的高超声速货运无人机<sup>⑦</sup>。中国也致力于在

① National Air and Space Museum. Hypersonic Flight. (2012-03-12). <https://airandspace.si.edu/stories/editorial/hypersonic-flight>.

② Prime Movers Lab. High-speed flight. [2024-01-29]. <https://www.primemoverslab.com/resources/ideas/high-speed-flight.pdf>.

③ 王楠. 法国高超音速导弹完成飞行测试. (2023-07-11). <http://military.people.com.cn/n1/2023/0711/c1011-40032975.html>.

④ SAE International. Boeing Debuts First Hypersonic Passenger Aircraft Concept. (2018-06-29). <https://www.mobilityengineering-tech.com/component/content/article/adt/stories/news/43612>.

⑤ Aerospace Testing International. Fast Forward: The companies racing to make a hypersonic aircraft. (2023-05-23). <https://www.aerospacetestinginternational.com/features/fast-forward-the-companies-racing-to-make-a-hypersonic-aircraft.html>.

⑥ 广东空天科技研究院. 便利与挑战共存——军民两用的高超音速飞机. (2023-01-05). [http://www.gara.ac.cn/xwzx/zhxw/202301/t20230105\\_125141.html](http://www.gara.ac.cn/xwzx/zhxw/202301/t20230105_125141.html).

⑦ NEW ATLAS. “Russia’s Elon Musk” is developing hypersonic rocket cargo planes. (2022-02-10). <https://newatlas.com/aircraft/destinus-hypersonic-aircraft/>.

“临近空间”飞行技术中取得突破，通过发布政策规划不断完善我国在可重复使用、天地往返飞行器，以及依托高超声速技术实现低成本空天往返等相关领域研究布局<sup>[12]</sup>。此外，以凌空天行、零壹空间等为代表的民营航天企业，也积极围绕空天技术需求、瞄准亚轨道飞行市场开展相关研究、不断向在“临近空间”实现商业飞行的目标靠近。

本文通过重点梳理美国、俄罗斯等主要国家在高超声速领域的重要研究部署和进展，并通过文献计量方法挖掘当前各国/地区研发格局，以期为我国在该技术领域的政策制定、未来发展规划、研发布局等提供参考。

## 2 关键研究进展

高超声速技术的应用主要涉及高超声速航行的飞行器，具体包括巡航导弹和军用飞机、高超声速客机，以及能水平起降的可重复使用空天飞机等<sup>⑧</sup>。高

超声速技术的研发主要集中在军事领域的高超声速武器，如弹道导弹、高超声速滑翔飞行器、高超声速巡航导弹等。

基于Web of Science核心合集数据库对高超声速技术领域的发文情况进行文献计量分析可以发现，1946年该领域首次有相关论文发表，是钱学森<sup>[2]</sup>发表在《数学与物理杂志》上的文章《论高超声速流的相似律》，首次给出了高超声速概念；1956—1990年该技术一直处于缓慢发展阶段；自1991年起，该领域开始出现快速、稳步增长的趋势（图1，相关检索策略见附录1）。

图2是VOSviewer构建的1946—2023年高超声速技术主题图谱，共形成了6个关键词聚类。① **动力推进技术**（绿色部分），包含超燃冲压发动机、联合循环发动机、燃油喷射、湍流燃烧等内容。② **制导与控制技术**（蓝色部分），包含滑动模式控制、自适应（模糊）控制、轨迹优化、容错控制、再入制导等内

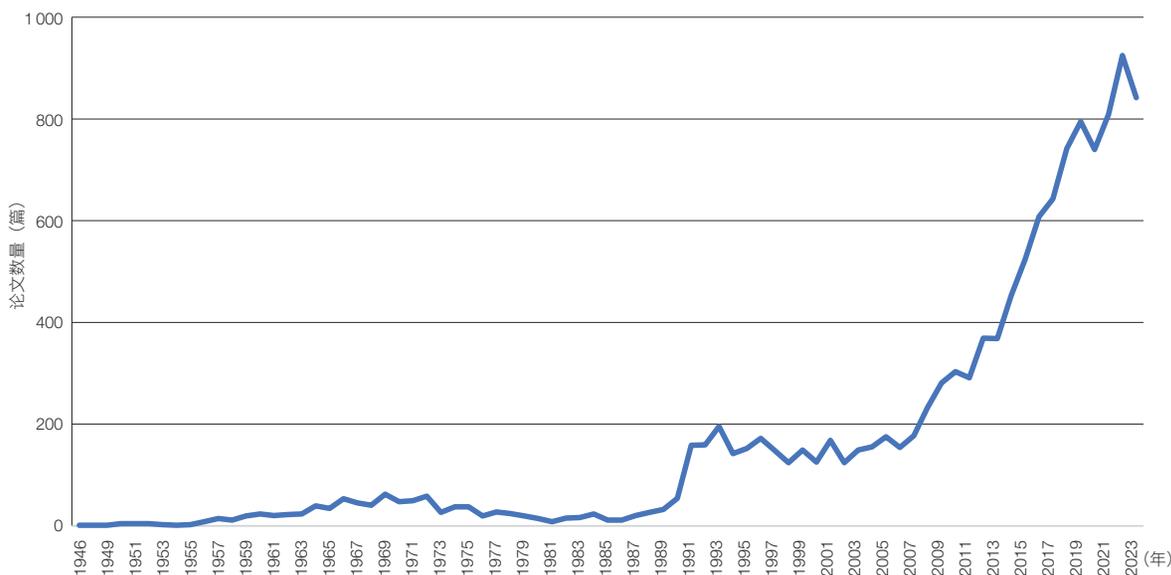


图1 1946—2023年高超声速相关论文发文趋势

Figure 1 Overall publication trends in hypersonic technology from 1946 to 2023

数据来源：Web of Science 核心合集数据库

Data source: Web of Science Core Collection Database

⑧ 清华大学·智谱AI. 全球高超音速技术发展报告(2022). [2024-01-29]. <https://static.aminer.cn/misc/pdf/hyperso22.pdf>.

容。③ 新型材料和热防护技术（黄色部分），包含热防护系统、机械性能、碳-碳化合物、陶瓷基复合材料、二硼化硅碳化物等内容。④ 高超声速风洞（浅蓝色部分），包含高超声速边界层、流体动力学稳定性、隧道等内容。⑤ 空气动力学（紫色部分），包含空气动力学、湍流、纳维-斯托克斯方程、数值模拟、高超声速流动等内容。⑥ 高超声速防御系统（红色部分），包含大气再入、等离子鞘、通信、雷达监测、核武器等内容。

综合上述计量结果和相关文献调研，考虑到高超声速风洞的研制是为模拟高超声速飞行过程中的空气动力学和热力学环境，以服务高超声速飞行器气动特

性研究。因此本文将高超声速技术领域的研究内容归纳为动力推进技术、制导与控制技术、新型材料和热防护技术、高超声速风洞、高超声速防御系统等5个方面，并在后文对这5方面内容进行综述。

## 2.1 动力推进技术

(1) 代表性动力推进技术。包括火箭动力技术、超燃冲压发动机技术，以及预冷却发动机、爆震发动机、磁流体发动机等新型动力推进技术。火箭动力技术是发展最早、应用最多的动力技术，但火箭动力的不可复用性会产生运行成本过高的问题，因此开发可复用的火箭运载技术，以及固体燃料是主要发展方向<sup>[13]</sup>。超燃冲压发动机是高超声速飞行器最理想的动

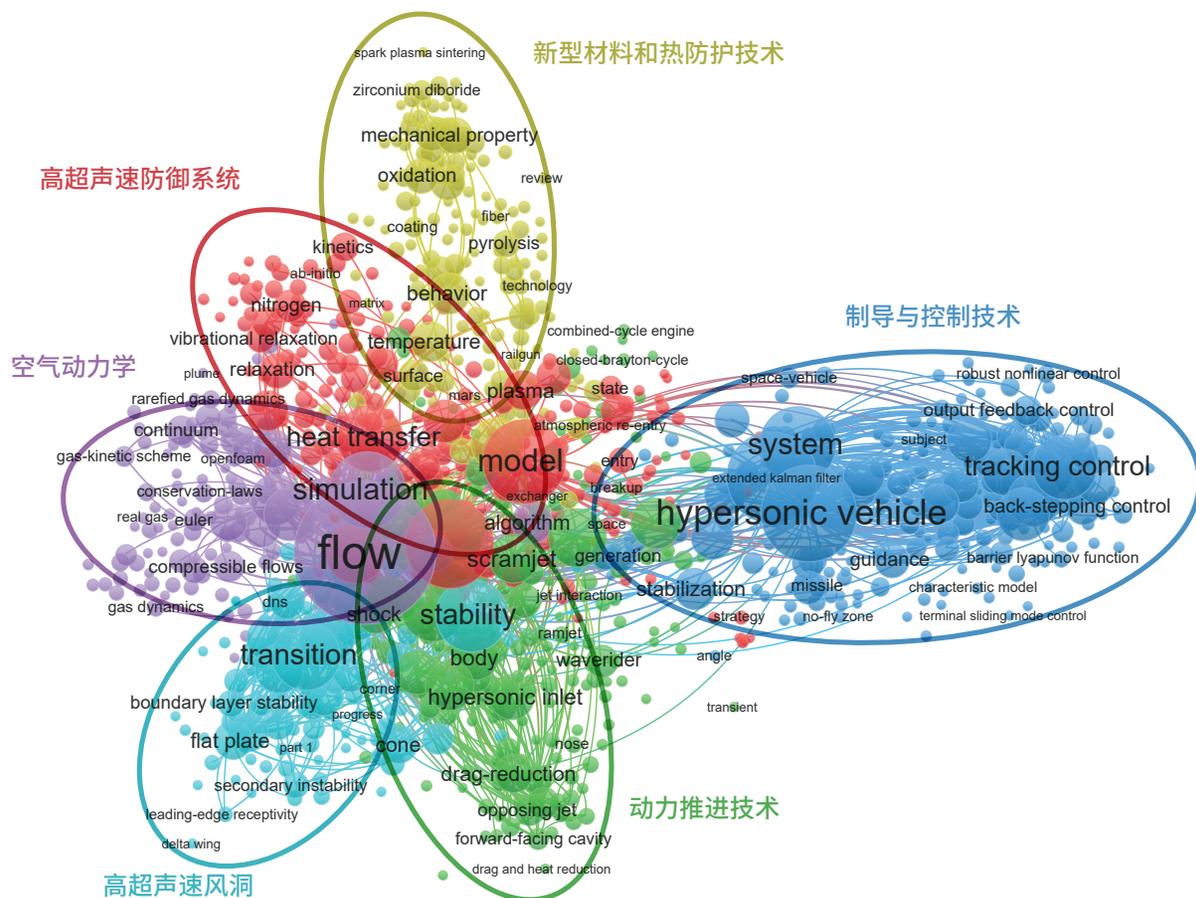


图2 1946—2023年高超声速技术主题图谱

Figure 2 Thematic map of hypersonic technology from 1946 to 2023

圆圈和标签组成一个元素，圆圈的大小取决于论文数量的多少，元素的颜色代表其所属的聚类，不同的聚类用不同的颜色表示  
A circle and a label form an element, the size of the circle depends on the number of documents, the color of the element represents the cluster to which it belongs, and different clusters are represented by different colors

力之一<sup>[14]</sup>。中国在2020年成功研制世界首台航空煤油再生冷却超燃冲压发动机，是继美国之后第二个将超燃冲压发动机用于高超声速飞行器并完成了自主飞行试验的国家<sup>⑨</sup>。另一种具备潜力的推进技术是**驻定斜爆震(SOD)发动机**。该发动机采用了斜爆轰来取代超燃冲压发动机燃烧器中以扩散为主的燃烧，具有功率密度高、燃烧室长度短、发动机结构简单等特点<sup>[15]</sup>。

(2) **组合发动机技术**。单一类型的发动机难以满足高超声速飞行器在大空域、宽速域、高性能飞行的需求，组合发动机具备综合性能高、适用范围广等优点，也是高超声速飞行器理想的动力装置之一。常见的组合动力推进技术有：火箭基组合循环动力(RBCC)、涡轮基组合循环动力(TBCC)、空气涡轮火箭组合发动机(ATR)等<sup>[16]</sup>。① **RBCC**。美国代表性的发动机有Strutjet发动机、A5发动机、GTX RBCC发动机等<sup>[17]</sup>。2022年，我国研制的“飞天一号”发射成功，首次验证了采用煤油燃料的RBCC在火箭/亚燃、亚燃、超燃、火箭/超燃等多模态中平稳过渡的能力<sup>⑩</sup>。② **TBCC**。由燃气涡轮发动机和亚/超燃冲压发动机组成，在0—3马赫范围内具有高比冲的优势<sup>[18]</sup>。美国代表性的发动机有RTA涡轮加速器、FRE发动机、猎鹰联合循环发动机(FaCET)、“三喷气”组合循环的涡轮喷气发动机；欧盟代表性的发动机有弯刀(Scimitar)发动机、“佩刀”(Sabre)发动机<sup>[18]</sup>。我国研发了涡轮辅助火箭增强冲压组合循环发动机(TRRE)，现已完成了该发动机原理样机的部件以及整机过渡态和稳态直连式验证<sup>[19]</sup>。③ **ATR**，可以采用多种燃料体系、可使飞行器在跑道上水平起降。美国

和日本在该领域开展了重点研究，多次进行试车研究和相关论证工作；中国也在该领域积极开展相关研究，但尚未有ATR发动机的试验对比研究发布<sup>[20]</sup>。

## 2.2 制导与控制技术

与传统飞行器相比，高超声速飞行器面临飞行环境更复杂、飞行包线跨域大、气动特性的变化认识有限等问题，对于控制系统设计提出了更为严苛的要求，因此高超声速控制是飞行器控制的前沿问题<sup>[21]</sup>。Li等<sup>[22]</sup>基于结构化奇异值理论的控制方法，设计了可用于高超声速飞行器的控制器，并在模拟实验中成功证明了该控制器具有出色的命令轨道性能。飞行马赫数控制是高超声速巡航飞行器重要的控制任务之一。Zhu等<sup>[23]</sup>设计了一种基于吸气式高超声速巡航飞行器的鲁棒马赫数控制器，并通过模拟实验验证了该控制器在马赫数控制系统方面的良好性能。Wang等<sup>[24]</sup>考虑了与超声速燃烧冲压测试相关的高超声速飞行器姿态建立和线性控制概念等关键问题，提出了一种无人高超声速测试飞行器的姿态控制系统，其中鲁棒控制器采用混合灵敏度方法设计。

**高超声速飞行时，飞行器周围的高动态等离子体鞘层会降低通信质量**。随着飞行参数的变化，等离子体鞘对电磁波的衰减效应会在短时间内减弱，进而产生“通信窗口”，但该窗口出现所需的参数随机。对此，Zhang等<sup>[25]</sup>提出了一个短帧喷泉代码(SFFC)，成功构建了一个时变等离子体护套通道模型，并通过模拟试验验证了SFFC提高通过等离子体鞘进行通信的可靠性。2022年，中国成功研制出一款名为“临近空间高速目标等离子体电磁科学实验研究装置”<sup>⑪</sup>，解决了等离子体鞘套(黑障)下通信的难题。随着该成果

⑨ 中国国际航空航天博览会. 中国高超音速飞机首飞细节公开. (2015-10-10). <https://www.airshow.com.cn/Item/11410.aspx>.

⑩ 西北工业大学. 西北工业大学“飞天一号”火箭冲压组合动力飞行试验圆满成功. (2022-07-05). <https://z.nwpu.edu.cn/info/1730/19605.htm>.

⑪ 十年磨一剑“黑障”破天光——记国家重大科研仪器研制项目“临近空间高速目标等离子体电磁科学实验研究装置”. (2023-02-28). <https://news.xidian.edu.cn/info/2106/223340.htm><https://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab440/info88664.htm>.

在高超声速武器和飞行器中的应用，将大幅提高指挥控制和末端机动的精度和效率。

高超声速飞行器的容错控制是需要研究的关键问题。Lu等<sup>[26]</sup>为执行器故障问题设计了一种强大的容错 $H_{\infty}$ 静态反馈控制器。Wang等<sup>[27]</sup>为吸气式高超声速飞行器的执行器障碍提出了一种基于实际有限时间活动模块方法的自适应容错控制策略，该策略的有效性通过模拟试验得到了验证。Ji等<sup>[28]</sup>基于时变滑动模式方法，为执行器发生故障的高超声速飞行器设计了一种姿态控制器。通过实验模拟，发现当特定通道的执行器完全卡住时高超声速飞行器仍然可以沿着参考轨迹飞行。

开发在线、实时的轨迹优化算法对于高超声速飞行器进入制导算法至关重要，近年来基于人工智能(AI)的制导算法在航空航天领域备受关注。2022年12月，美国亚利桑那大学教授罗伯特·弗法罗获得了应用高超声速大学联盟赞助的450万美元奖励，用于开发基于AI驱动的高超声速自动驾驶飞行器的制导、导航和控制系统<sup>⑫</sup>。

### 2.3 新型材料和热防护技术

高超声速飞行器要能应对更加严峻的热环境，即长时间加热的情况下飞行器表面不烧蚀，以及飞行器外形结构不变形。

在高超声速飞行器新型材料研究过程中，有机复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料一直是研究的重点。超高温陶瓷(UHTC)是指IV族和V族过渡金属碳化物、氮化物和硼化物，UHTC被认为是适合制造或保护置于如高温核反应堆、高超声速飞行等极端操作环境下的部件材料。2018年，英国伦敦大学科学家成功制备了一种高熵超高温陶瓷碳化物<sup>[29]</sup>。

2022年10月，美国杜克大学科学家设计了一种可调节等离子体特性的高熵过渡金属碳化物(PHECs)<sup>[30]</sup>，其硬度足以搅拌钢水，并且可以承受7 000°F以上的温度。2024年，华南理工大学科学家成功制备了一种具备超强机械承重力和高隔热性能的多孔高熵二硼化物陶瓷，该材料可承受最高达2 000°C高温，室温下可承受337 MPa、2 000°C下可承受690 MPa的超高抗压强度<sup>[31]</sup>。此外，二硼化锆、二硼化铪等耐火二硼化物复合材料，碳酚醛、石墨等碳基复合材料，以及碳化硅、碳化硼等碳/碳复合材料也被证明是最具潜力的超高温材料<sup>[32]</sup>。

热防护系统(TPS)从防护概念上可分为被动TPS、主动TPS和半被/主动TPS<sup>[32-34]</sup>。被动TPS，多选择碳/碳基、陶瓷基、金属基等复合材料；主动TPS，多选用金属材料；半被/主动TPS，包括热管和消融器、需根据结构选择不同类型的材料，热管选择耐高温金属热管、碳/碳或陶瓷基复合材料，消融器多选用烧蚀材料<sup>[34]</sup>。

长时间飞行的高超声速飞行器将促使典型服役温度和总价热量远超现有飞行器，但传统设计手段难以满足急剧增加热载荷要求。一方面，多物理防热、薄层轻质、隐身、可重复使用等多功能耦合的防热材料设计是未来研究的重点；另一方面，半主动、半主动/主动、主动等多机制耦合热防护技术将成为主要发展方向<sup>[35]</sup>。

### 2.4 高超声速风洞

高超声速风洞通过产生高超声速流场，从而模拟该流态的典型流动特征——包括停滞区流场、压缩激波和高速边界层转换、熵层和黏性相互作用区，以及高温等。高超声速风洞可以模拟高空、高速飞行的环

⑫ Emily Dieckman. Engineer awarded \$4.5M to develop AI-powered hypersonic guidance and navigation systems. (2022-11-05). <https://ssel.arizona.edu/news/engineer-awarded-45m-develop-ai-powered-hypersonic-guidance-and-navigation-systems#:~:text=Roberto%20Furfaro%2C%20a%20University%20of%20Arizona%20professor%20of,systems%20for%20autonomous%20vehicles%20operating%20at%20hypers.>

境和条件，以分析弹道导弹、高超声速飞行器、太空发射器等在高超声速飞行时的空气动力学数据，是高超声速技术领域相关研究的关键试验装置。

高超声速风洞研究的关键问题在于如何加热试验气体以模拟高超声速飞行条件下的气流总温、气体流动速度，以及克服尺寸效应获得足够大的流场。高超声速风洞按照驱动方式可以分为直接加热驱动、加热轻气体驱动、自由活塞驱动，以及爆轰驱动4类<sup>[36]</sup>。2023年，中国成功研制了可以模拟高达30马赫高超声速飞行环境的“爆轰驱动超高速高焓激波风洞”（JF-22超高速风洞），标志着中国高超声速技术迈上新台阶<sup>⑬</sup>。

## 2.5 高超声速防御系统

高超声速武器的飞行范围十分广泛，具备高空侦察、高速突防、远程精确打击等能力；因为其飞行速度很快，对防御方防御系统的快速反应和快速决策提出了更高要求。现有防空反导系统很难精确识别以高超声速飞行的飞行器，因此对高超声速飞行器进行轨迹预测、及时检测和识别观察、连续跟踪等研究，对未来航空航天防御体系具有重要意义<sup>[37]</sup>。

已有研究集中于打造海陆空天一体化的多方位、多手段的监测体系；同时聚焦于末端拦截技术、开发新型拦截弹，以及选取高能激光武器和电子干扰技术作为备选<sup>[38,39]</sup>。张俊彪等<sup>[37]</sup>提出了一种基于集合经验模态分解和注意力长短时记忆网络的高超声速滑翔飞行器（HGV）轨迹智能预测方法，能有效预测HGV的机动轨迹。Yuan等<sup>[40]</sup>提出了一种基于高光谱特征的高超声速目标飞行状态精准识别的无监督分类算法，可以在临近空间发现锁定高超声速飞行器。Liu等<sup>[41]</sup>

基于拦截器和高超声速飞行器的不同机动配置，建立了3个拦截场景以研究3个拦截场景中每个因素对拦截性能的影响。

## 3 全球高超声速技术研发格局

### 3.1 主要发文国家分析

图3呈现了高超声速技术领域发文量排名前10位的国家历年论文发表情况（统计时间1991—2023年）。中国和美国是最主要的发文国家，初期（2006年之前）美国具有显著优势；自从2006年中国发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》将大型飞机重大专项、高超声速飞行器科技工程确定为16个重大科技专项，以及2007年国务院常务会议批准大型飞机研制重大科技专项正式立项之后，中国在该领域的发文量开始快速增长，并于2010年首次超过美国，至今一直处于领先地位。

（1）美国。当前，美国认为其高超声速导弹技术方面已经处于落后地位，对此美国国防部（DOD）将高超声速技术与武器的发展提升到决定胜败的战略高度，并不断发布战略规划以指导、推进高超声速技术发展。2021年，为应对高超声速武器系统等高端系统带来的挑战，DOD围绕进攻性高超声速能力、开发和部署用于防御高超声速系统的分层系统、可重复使用的高超声速系统等3个研究方向，制定了1项综合战略<sup>⑭</sup>。2022年2月，美国国家科学技术委员会发布的更新版“关键和新兴技术清单”中，将高超声速技术列为关键和新兴技术；4月，美国兰德公司发布的《破坏威慑：21世纪战略威慑技术的影响研究》报告中将高超声速武器列为八大技术之一；10月，美国发

⑬ 央视网. 支撑天地往返！JF-22超高速风洞通过验收. (2023-06-05). <https://news.cctv.com/2023/06/05/ARTIzNRVKVuRx6nj-uPBfZwAZ230605.shtml>.

⑭ U. S. Department of Defense. Official Describes DOD Hypersonics Development, Strategy and Opportunities. (2021-02-24). <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/2514498/official-describes-dod-hypersonics-development-strategy-and-opportunities/>.

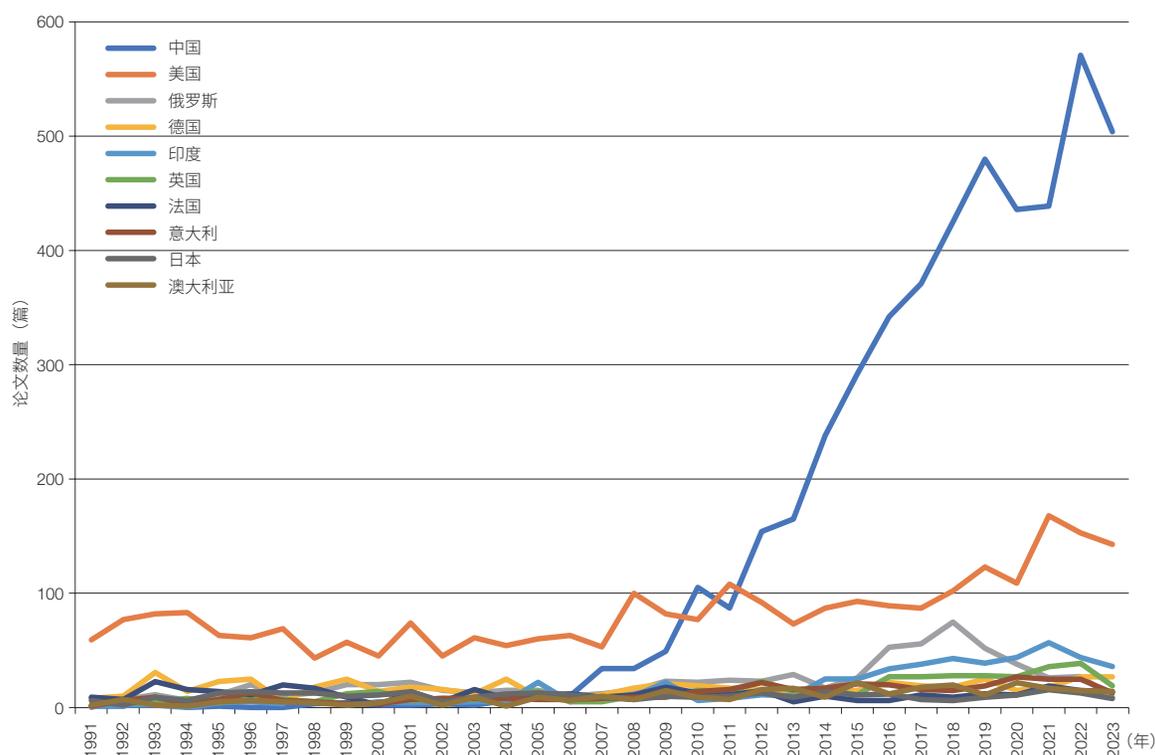


图3 1991—2023年发文量前10位国家历年论文发文情况

Figure 3 Annual publication of the top 10 countries by number of publications from 1991 to 2023

布《国防战略》和《导弹防御评估报告》报告强调，将继续发展主动和被动结合的防御系统以应对高超声速导弹威胁，以及研发能识别跟踪所有高超声速威胁的感应网络。根据DOD 2024财年预算请求，将申请298亿美元用于加强导弹击落和防御，涉及网络行动和高超声速打击能力的技术和演示等内容；110亿美元用于提供各种高杀伤力的精确武器，包括开发、测试和采购高超声速武器。此外，美国国会批准了2.25亿美元的额外资金，计划在2040年底之前部署“不少于24个”滑翔阶段拦截器<sup>⑮</sup>。美国正在研制多种高超声速武器，包括以火箭驱动的“战术助推滑翔”导弹(TBG)、高超声速巡航导弹(HAWC)、高超声速空

射巡航导弹(HALO)，并通过“高超声速和高节奏机载试验能力”(HyCAT)项目构建高超声速飞行试验平台；同时不断加快高超声速飞机的研究，如发布“女武神”高超声速无人机模型设计图、“观星者”高超声速飞机概念图、完成了“夸特马”(Quarterhorse)高超声速飞机发动机的地面试验等<sup>[42]</sup>。

(2) 俄罗斯。此前俄罗斯在高超声速领域的相关工作一直处于秘密研发状态，2018年开始才有相关研究成果公布。俄罗斯是世界上第一个生产和列装高超声速巡航导弹的国家，目前主要研制了3种高超声速导弹<sup>⑯</sup>——“先锋”高超声速洲际弹道导弹、“锆石”巡航导弹和“匕首”高超声速空射弹道导弹，且均正

<sup>⑮</sup> DefenseNews. Congress demands quicker fielding of hypersonic weapons interceptor. (2023-12-19). <https://www.defensenews.com/pentagon/2023/12/18/congress-demands-quicker-fielding-of-hypersonic-weapons-interceptor/>.

<sup>⑯</sup> Army Recognition. Analysis: Russia uses new hypersonic missiles in Ukraine which cannot be intercepted. (2022-12-24). [https://www.armyrecognition.com/defense\\_news\\_december\\_2022\\_global\\_security\\_army\\_industry/analysis\\_russia\\_uses\\_new\\_hypersonic\\_missiles\\_in\\_ukraine\\_which\\_cannot\\_be\\_intercepted.html](https://www.armyrecognition.com/defense_news_december_2022_global_security_army_industry/analysis_russia_uses_new_hypersonic_missiles_in_ukraine_which_cannot_be_intercepted.html).

式服役。为确保空天优势，俄罗斯国防部，一方面持续推进高超声速导弹项目建设，X-95新型远程高超声速导弹的研发已取得极大进展，并将该导弹列入远程航空打击系统装备<sup>⑰</sup>，“小精灵”高超声速空射导弹<sup>⑱</sup>、“锐利”机载小型高超声速导弹、“蛇纹石”反舰弹道导弹<sup>⑲</sup>、“KH-95”远程高超声速空射战略巡航导弹等处于开发测试阶段。另一方面不断加强对现有高超声速打击体系的完善和发展，持续推出新的核潜艇，如研制可携带高超声速武器的“未来远程战略轰炸机”、对可发射“锆石”高超声速导弹的“阿库拉”“奥斯卡”级核潜艇进行现代化升级改造等。俄罗斯持续推进新一代空天联合防御系统试验与部署，S-500、S-550等反卫星、反高超声速系统取得重大进展<sup>[43]</sup>。此外，俄罗斯还在积极研发高超声速狙击步枪子弹，已开始测试速度最终能达到1 500米/秒以上的高超声速狙击弹<sup>⑳</sup>。

(3) 中国。中国在高超声速领域的研究起步较晚，随着相关政策规划的发布不断推进高超声速技术的发展，基本解决或初步解决高超声速飞行器研究过程中的相关技术难题。国内制造和部署高超声速飞行器的能力正在迅速发展，相关高超声速研发成果有DF-5洲际弹道导弹、DF-17高超声速弹道导弹、“星空-2”乘波体高超声速飞行器、“鹰击-21”高超声速反舰导弹等。

(4) 澳大利亚、日本、德国、以色列、韩国等。纷纷制定了政策规划、积极探索高超声速领域相关技

术的发展。

### 3.2 主要资助机构

图4是高超声速技术主要资助机构论文数及影响力（影响力用资助论文的篇均被引频次来体现）。

从论文数来看，中国国家自然科学基金委员会（NSFC）是该领域的最大资助机构——NSFC资助产出论文共2 803篇，占前20位资助机构总论文数的48.7%。基于国家空天安全的重大需求，NSFC分别于2002年和2007年启动了与空天飞行器相关的重大研究计划，以引导中国在高超声速技术领域的基础研究工作，此后通过重点项目、面上项目、青年科学基金等不断加大对该领域相关研究的支持力度<sup>[44]</sup>。

从影响力来看，英国的2个机构影响力排名前2位，分别为英国研究与创新署（UKRI，影响力25.28）、英国工程和物理科学研究理事会（EPSRC，影响力25.99）。UKRI包含EPSRC在内的9个研究组织；EPSRC共设立了9个资助行业组（sector grouping），当前（数据统计时间截至2024年5月31日）资助中的航空航天、国防和海洋领域项目共198个项目、资助金额近5.2亿英镑<sup>㉑</sup>。根据UKRI 2022—2025年基础设施基金项目，UKRI计划8年内投入5200万英镑用于国家风洞基础设施建设（NWTF+）。此外，英国国防部2023年更新的《国防科学与技术投资组合》表示将至少投资66亿英镑用于国防科学研究项目，其中第17个项目是研究和开发未来高超声速概念和技术<sup>㉒</sup>。

⑰ 人民网. 从X-95新型高超音速导弹看俄武器装备发展计划. (2021-10-21). <http://military.people.com.cn/n1/2021/1021/c1011-32260204.html>.

⑱ 航天防务. 2022年俄罗斯高超声速武器发展综述. (2023-01-10). <https://mp.weixin.qq.com/s/-9u0w6NYqu-fQLymR3pVdg>.

⑲ NAVALNEWS. Russia Develops Zmeevik Anti-Ship Ballistic Missile. (2022-01-13). <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/07/russia-develops-zmeevik-anti-ship-ballistic-missile/>.

⑳ 俄罗斯卫星通讯社. 俄罗斯开始测试高超音速狙击弹. (2023-09-19). <https://sputniknews.cn/20230919/1053467036.html>.

㉑ EPSRC Support By Industrial Sector. [2024-01-31]. <https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOListSectors.aspx>.

㉒ GOV. UK. Ministry of Defence's Science and Technology portfolio. (2023-01-23). <https://www.gov.uk/government/publications/defence-science-and-technology-programmes-and-projects/ministry-of-defences-science-and-technology-portfolio#introduction>.

资助发文量排名前20位的资助机构中美国有6家，自DOD启动“国家航空航天倡议”(NAI)后，一直积极与美国能源部、NASA及各高校就开发高超声速武器和技术开展合作。美国对高超声速技术的经费投入一直呈上升状态<sup>[45]</sup>——2023年美军高超声速技术研发经费达51.26亿美元，2024年高超声速技术预算经费为50.49亿美元<sup>[46]</sup>。

## 4 讨论与展望

高超声速技术在军事上的强突防、强侦察及远程精确打击，以及民用上的可大幅缩减洲际商务飞行时间、具备太空旅行等能力，被很多国家视为未来军事科技、民用航空领域的新制高点，以及未来大国博弈的重要工具，具有可能重新定义战争规则的重大意义。世界各国不断加大在该领域的研发力度，纷纷出台相关政策规划以促进该技术的发展。对此，提出我国未来在高超声速技术领域的3点建议。

### (1) 注重相关政策、规划制定，以及对重点资助

的技术方向和资助方式的延续性。以美国为例，美国是较早在该领域发展的国家之一，由于相关政策规划的不断调整，使得其在该领域的发展循环往复<sup>②</sup>。因此，建议通过发布相关政策规划，明确我国在高超声速技术领域的优先发展事项；同时依托国家自然科学基金、国家科技重大专项，以及设立联合基金项目等方式，确保高超声速领域研究获得持续的经费投入。

(2) 在5个方面完善高超声速技术布局。① 动力推进技术、制导与控制技术、新型材料和热防护技术等是高超声速领域的热点研究方向，因此可以通过设立重大科技任务的方式促进上述相关研究的发展，以克服高速推进系统、可重复利用技术、极端高温、材料性能等部署高超声速武器面临的技术挑战。② 加快建设针对不断增强高超声速武器的防御系统，装备更具灵活性、高生存能力和低成本的高超声速防御系统和太空传感器是需要关注的重点方向。世界主要国家也正积极开展高超声速武器防御系统的研发。例如，2022年俄罗斯成功试射了新型导弹防御系统，该系统

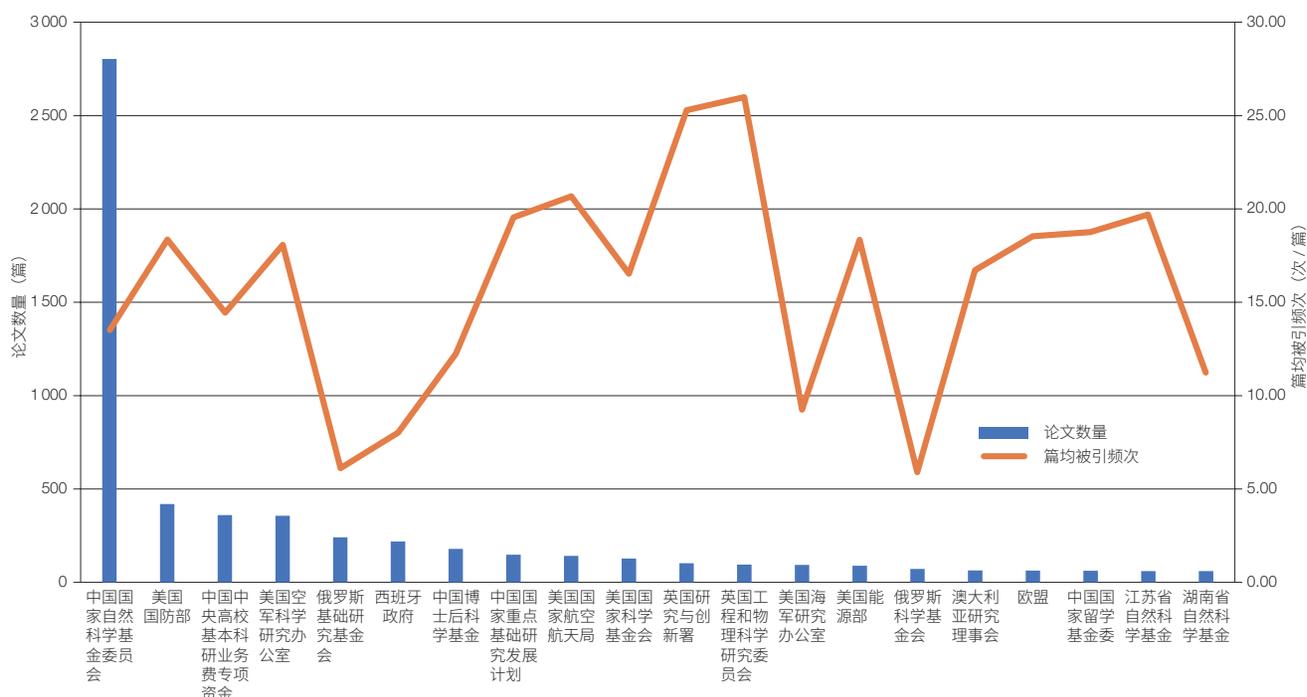


图4 1980—2023高超声速技术主要资助机构论文数及影响力

Figure 4 Number and influence of papers from major funding institutions from 1980 to 2023

已在航空航天部队服役，旨在防御高超声速武器等空中和太空攻击；美国也将优先考虑建立防御架构，以对抗来自对手的高超声速武器。③注重高超声速地面试验和飞行试验能力建设，依托不断更新升级的地面试验设施和飞行试验平台的能力，构建我国高超声速技术发展生态。④以高超声速飞行的飞机可以在地球上形成一个新的商业点对点运输市场。建议我国加快探索高超声速技术在民用领域的应用、研发可重复使用高超声速飞行器、实现相关核心技术和供应链自主可控。⑤目前，还没有关于使用高超声速武器的多边或双边条约，因此在联合防空和导弹防御等方面达成相关国际协议也是未来需要关注的重点。

(3) 加速相关研究成果向实际应用转化。我国在超燃冲压发动机、高超声速风洞、制导与控制技术等方面不断取得突破，在新型耐高温材料研发等方面也有了丰富的研究成果。未来还需采取如设立成果转化基金、鼓励研发机构与企业形成创新攻关共同体、围绕产业需求构建相关科研任务等方法构建高超声速领域产学研协同的创新发展道路，提高研究成果从实验室向市场转化的效率，不断增强我国在高超声速领域的自主攻关能力。

### 参考文献

- Anderson J D. Hypersonic and High Temperature Gas Dynamics. New York: McGraw-Hill Book Company, 1989
- Tsien H S. Similarity laws of hypersonic flows. *Journal of Mathematics and Physics*, 1946, 25: 247-251.
- Sänger E, Szames A D. From the silverbird to interstellar voyages// 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law. Reston, Virginia: AIAA, 2003: IAC-03-IAA.2.4.a.07.
- Sobolev D A, Sollinger G. Eugen Sanger's hypersonic bomber project and idea of its realization in the USSR in 1946// 2017 International Workshop on Engineering Technologies and Computer Science (EnT). Moscow: IEEE, 2017: 68-69.
- Eckardt D. The 1 × 1 m hypersonic wind tunnel Kochel/Tulahoma 1940-1960. *CEAS Space Journal*, 2015, 7: 23-36.
- Bertin J J, Cummings R M. Fifty years of hypersonics: Where we've been, where we're going. *Progress in Aerospace Sciences*, 2003, 39(6-7): 511-536.
- Speier R H, Nacouzi G, Lee C, et al. Hypersonic Missile Nonproliferation: Hindering the Spread of a New Class of Weapons, RR-2137-CC. Santa Monica: RAND Corporation, 2017.
- 柴山. 高超声速武器优势何在. *解放军报*, 2021-02-04(07).  
Chai S. What are the advantages of hypersonic weapons. *PLA Daily*, 2021-02-04(07). (in Chinese)
- Congressional Budget Office. U.S. Hypersonic Weapons and Alternatives, 58255. Washington DC: Congressional Budget Office, 2023.
- 杨诗瑞. 印度首次试射高超声速飞行器. *太空探索*, 2020, (1): 65-67.  
Yang S R. India test-fired a hypersonic vehicle for the first time. *Space Exploration*, 2020, (1): 65-67. (in Chinese)
- Viola N, Fusaro R, Saracoglu B, et al. Main challenges and goals of the H2020 STRATOFly project. *Aerotecnica Missili & Spazio*, 2021, 100(2): 95-110.
- 艾瑞咨询. 2021年中国超音速临近空间飞行器行业研究报告. 上海: 上海艾瑞市场咨询有限公司, 2021.  
Iresearch. 2021 China Supersonic Proximity Space Vehicle Industry Research Report. Shanghai: Iresearch, 2021. (in Chinese)
- 刘晓波, 罗月培, 孙杭义. 美俄高超声速武器动力技术发展趋势研究. *战术导弹技术*, 2021, (6): 111-120.  
Liu X B, Luo Y P, Sun H Y. Research on development trends for the propulsion technology of hypersonic weapons in the United States and Russia. *Tactical Missile Technology*, 2021, (6): 111-120. (in Chinese)
- 李旭彦, 郑星, 薛瑞. 超燃冲压发动机技术发展现状及相关建议. *科技中国*, 2019, (2): 5-8.  
Li X Y, Zheng X, Xue R. Development status of scramjet technology and related suggestions. *China Scitechnology*

- Business, 2019, (2): 5-8. (in Chinese)
- 15 Jiang Z L, Zhang Z J, Liu Y F, et al. Criteria for hypersonic airbreathing propulsion and its experimental verification. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(3): 94-104.
- 16 张升升, 郑雄, 吕雅, 等. 国外组合循环动力技术研究进展. 科技导报, 2020, 38(12): 33-53.
- Zhang S S, Zheng X, Lü Y, et al. Research progress of oversea combined cycle propulsion technology. Science & Technology Review, 2020, 38(12): 33-53. (in Chinese)
- 17 张玫, 张蒙正, 刘昊. 火箭基组合循环动力研究进展. 科技导报, 2020, 38(12): 54-68.
- Zhang M, Zhang M Z, Liu H. Progress and analysis of rocket based combined cycle (RBCC) propulsion system. Science & Technology Review, 2020, 38(12): 54-68. (in Chinese)
- 18 陈敏, 贾梓豪. 涡轮基组合循环动力关键技术进展. 科技导报, 2020, 38(12): 69-84.
- Chen M, Jia Z H. Progress and prospect of key technologies for turbine based combined cycle engine. Science & Technology Review, 2020, 38(12): 69-84. (in Chinese)
- 19 韦宝禧, 凌文辉, 江强, 等. TRRE 发动机关键技术分析及推进性能探索研究. 推进技术, 2017, 38(2): 298-305.
- Wei B X, Ling W H, Gang Q, et al. Analysis of key technologies and propulsion performance research of TRRE engine. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(2): 298-305. (in Chinese)
- 20 南向谊, 刘轶, 马元, 等. 空气涡轮火箭发动机热力过程及工作特性. 空气动力学学报, 2022, 40(1): 181-189.
- Nan X Y, Liu Y, Ma Y, et al. Thermodynamic process and operating characteristics of air turbo rocket engine. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(1): 181-189. (in Chinese)
- 21 张远, 黄旭, 路坤锋, 等. 高超声速飞行器控制技术研究与展望. 宇航学报, 2022, 43(7): 866-879.
- Zhang Y, Huang X, Lu K F, et al. Research progress and prospect of the hypersonic flight vehicle control technology. Journal of Astronautics, 2022, 43(7): 866-879. (in Chinese)
- 22 Li G, Xu L W, He H, et al. A control method of hypersonic vehicle based on the structured singular value theory. Applied Mechanics and Materials, 2011, 128-129: 761-764.
- 23 Zhu W B. Robust control for air-breathing hypersonic cruise vehicles// Proceedings of 2013 Chinese Intelligent Automation Conference. Lecture Notes in Electrical Engineering. Berlin: Springer, 2013, 255: 191-198.
- 24 Wang X, Feng D Z, Lin Y. Attitude control of unmanned hypersonic test vehicle// 2008 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics. Shenzhen: IEEE, 2008: 1-5.
- 25 Zhang H J, Yang M, Bao W M, et al. Short-frame fountain code for plasma sheath with "communication windows". IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15569-15579.
- 26 Lu P L, Liu X D. Robust fault-tolerant  $H_\infty$  control for hypersonic vehicle attitude control system// Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Yantai: IEEE, 2011: 4313-4316.
- 27 Wang J, Zong Q, He X, et al. Adaptive finite-time control for a flexible hypersonic vehicle with actuator fault. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 920796.
- 28 Ji H B, Wang L, Song Z Y, et al. Trajectory tracking based on time-varying sliding mode controller for hypersonic vehicle with aileron stuck// 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian: IEEE, 2017: 985-989.
- 29 Castle E, Csanádi T, Grasso S, et al. Processing and properties of high-entropy ultra-high temperature carbides. Scientific Reports, 2018, 8: 8609.
- 30 Calzolari A, Oses C, Toher C, et al. Plasmonic high-entropy carbides. Nature Communications, 2022, 13(1): 5993.
- 31 Wen Z H, Tang Z Y, Liu Y W, et al. Ultrastrong and high thermal insulating porous high-entropy ceramics up to 2000°C. Advanced Materials, 2024, 36(14): e2311870.
- 32 高铁锁, 江涛, 丁明松, 等. 再入体碳基防热材料烧蚀流场红外辐射模拟. 红外与激光工程, 2023, 52(5): 231-241.
- Gao T S, Jiang T, Ding M S, et al. Simulation of flow field infrared radiation over reentry vehicle with ablation of carbon-based thermal protection material. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(5): 231-241. (in Chinese)
- 33 沈斌贤, 曾磊, 刘骁, 等. 高超声速飞行器主动质量引射热防护技术研究进展. 空气动力学学报, 2022, 40(6): 1-13.
- Shen B X, Zeng L, Liu X, et al. Research progress of thermal protection technique by activemass injection for hypersonic vehicle. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(6): 1-13. (in

- Chinese)
- 34 邢亚娟, 孙波, 高坤, 等. 航天飞行器热防护系统及防热材料研究现状. 宇航材料工艺, 2018, 48(4): 9-15.  
Xing Y J, Sun B, Gao K, et al. Research status of thermal protection system and thermal protection materials for aerospace vehicles. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(4): 9-15. (in Chinese)
- 35 艾邦成, 陈思员, 陈智, 等. 关于高超声速飞行器新热障的认知与探讨. 气体物理, 2023, 8(4): 1-17.  
Ai B C, Chen S Y, Chen Z, et al. Cognition and discussion on new thermal barrier of hypersonic vehicles. Physics of Gases, 2023, 8(4): 1-17. (in Chinese)
- 36 姜宗林. 高超声速高焓风洞试验技术研究进展. 空气动力学学报, 2019, 37(3): 347-355.  
Jiang Z L. Progresses on experimental techniques of hypersonic and high-enthalpy wind tunnels. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(3): 347-355. (in Chinese)
- 37 张君彪, 熊家军, 兰旭辉, 等. 一种高超声速滑翔飞行器轨迹智能预测方法. 宇航学报, 2022, 43(4): 413-422.  
Zhang J B, Xiong J J, Lan X H, et al. An intelligent prediction method of hypersonic glide vehicle trajectory. Journal of Astronautics, 2022, 43(4): 413-422. (in Chinese)
- 38 尚敦敏, 史峰. 高超音速导弹防御难在何处. 中国国防报, 2023-05-16(04).  
Shang D M, Shi F. What is the difficulty of hypersonic missile defense. ZhongGuo Guofang Bao, 2023-05-16(04). (in Chinese)
- 39 刘思彤, 张占月, 刘达, 等. 高超声速武器防御装备体系发展及顶层思考. 世界科技研究与发展, 2022, 44(5): 618-630.  
Liu S T, Zhang Z Y, Liu D, et al. Development and top-level thinking of hypersonic weapon defense equipment system. World Sci-Tech R&D, 2022, 44(5): 618-630. (in Chinese)
- 40 Yuan S R, Shi L, Zhai Y T, et al. An unsupervised classification method of flight states for hypersonic targets based on hyperspectral features. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(5): 434-446.
- 41 Liu S X, Liu S J, Yan B B, et al. Interception of a hypersonic vehicle by low-speed interceptors: Novel perspectives and cost optimisation. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 2022, 70(6): 143537.
- 42 李茜. 2022高超声速技术进展. 航空动力, 2023, (1): 15-18.  
Li X. Progress of hypersonic technology in 2022. Aerospace Power, 2023, (1): 15-18. (in Chinese)
- 43 杨慧君. S-550: 未来俄罗斯天空防御的中坚力量. 太空探索, 2023, (4): 62-66.  
Yang H J. S-550: The backbone of Russian air and space defense in the future. Space Exploration, 2023, (4): 62-66. (in Chinese)
- 44 张攀峰, 詹世革. 从国家自然科学基金资助看高超声速流动研究的发展现状. 航空学报, 2015, 36(1): 1-6.  
Zhang P F, Zhan S G. Development of hypersonic flow research in China based on supported projects of NSFC. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(1): 1-6. (in Chinese)
- 45 苑桂萍, 胡冬冬. 近二十年来美军高超声速领域科研投入分析. 飞航导弹, 2019, (8): 77-83.  
Yuan G P, Hu D D. Analysis of US army's scientific research investment in hypersonic field in recent twenty years. Aerodynamic Missile Journal, 2019, (8): 77-83. (in Chinese)
- 46 苑桂萍, 肖益, 余明璐. 美军2018—2024财年高超声速技术领域科研预算分析. 战术导弹技术, 2023, (5): 64-72.  
Yuan G P, Xiao Y, Yu M L. Analysis of US military research budget in hypersonic technology in FY 2018–2024. Tactical Missile Technology, 2023, (5): 64-72. (in Chinese)

## Analysis on development trend of global hypersonic technology

HUANG Xiaorong<sup>1</sup> CHEN Yunwei<sup>1,2\*</sup> ZHOU Haichen<sup>1</sup>

(1 National Science Library (Chengdu), Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China;

2 Department of Information Resources Management, School of Economics and Management,  
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Hypersonic technology is a key technology in the aerospace field in the future and is of very important strategic and forward-looking significance. Using bibliometric methods, it is found that research on hypersonic technology is mainly concentrated in the military field, among which power propulsion technology, navigation guidance and control technology, thermal protection technology and new materials are important research directions in this field. After sorting out the research and development situation of various countries, it is found that the relevant core technologies related to the development of hypersonic weapons are still the focus of future research. At the same time, accelerating the deployment of hypersonic defense systems and strengthening cooperation with partner countries in technology research and development, joint air defense and missile defense to enhance regional defense and deterrence are also priorities for future deployment of countries.

**Keywords** hypersonic technology, hypersonic weapon, power propulsion technology, navigation guidance and control technology, new material and thermal protection technology, hypersonic wind tunnel, hypersonic defense system

黄小容 中国科学院成都文献情报中心助理馆员。主要研究领域:科学计量学等。E-mail: huangxiaorong@clas.ac.cn

**HUANG Xiaorong** Assistant Librarian of National Science Library (Chengdu), Chinese Academy of Sciences. Her research focuses on scientometrics, etc. E-mail: huangxiaorong@clas.ac.cn

陈云伟 中国科学院成都文献情报中心创新研究部主任,研究员,科技创新评价研究中心(SERC)主任。主要研究领域:科技创新评价、科技战略咨询、科技政策、科学计量学。E-mail: chenyw@clas.ac.cn

**CHEN Yunwei** Professor and Director of the Innovation Research Department of National Science Library (Chengdu), Chinese Academy of Sciences, Director of Sci-tech Innovation Evaluation Research Center (SERC). His research focuses on scientific and technological innovation evaluation, scientific and technological strategic consulting, scientific and technological policy, scientometrics. E-mail: chenyw@clas.ac.cn

■ 责任编辑:岳凌生

\*Corresponding author

## 附录 1: 高超声速技术主题论文检索策略

Web of Science 核心合集对高超声速技术领域的研究论文基本上都有收录,能较为全面地反映对高超声速技术领域的发文情况。对此,本文以 Web of Science 核心合集为数据源进行相关论文的检索;为了检索全面、在主要检索字段中用检索词 hypersonic 进行主题检索,限定论文类型为: Article/Review Article/Proceeding Paper。随后基于 Web of Science 数据库自带的精炼功能对检索出的论文按领域划分(Web of Science Categories)进行多次检查,其中对于非本文主题所需的论文用布尔逻辑检索运算符(AND/OR/NOT)排除。最后经人工抽样检查、确保检索出的论文基本符合,共获得相关文献 12 569 篇,检索时间为 2024 年 1 月 25 日。本文利用可视化分析软件 VOSviewer1.6.19 和 Web of Science 数据库自带的 InCites 分析平台(数据分析年份 1980—2023 年)进行分析。

检索式: TS=((hypersonic\*) NOT (("Hypersonic imaging\*" AND ("GaN NANOROD ARRAYS\*" OR "Hypersonic Imaging and Emission Spectroscopy\*")) OR ("Hypersonic Wave\*" NOT "hypersonic waverider\*" NOT "HYPERSONIC WAVE RIDER\*" NOT "hypersonic wavecatcher\*") OR ("hypersonic thoracic percussion") OR ("Hypersonic vitrectomy") OR ("Hypersonic Sensation") OR ("Hypersonic phase-conjugation mirror") OR ("Hypersonic Absorption") OR ("LOW-DENSITY HYPERSONIC AERODYNAMIC TESTING") OR ("BRILLOUIN") OR ("Hypersonic relaxation\*") OR ("hypersonic effect") OR ("pre-hypersonic") OR ("hypersonic vibration\*") OR (("hypersonic pulse\*") NOT ("hypersonic pulsed wind tunnel\*" OR "hypersonic pulse detonation engine\*" OR "hypersonic pulse tube\*" OR "hypersonic pulse facility\*" OR "hypersonic pulsed facilities\*")) OR (("HYPERSONIC FIELD\*") AND ("acous-

tic\*" OR "Planar radiation\*" OR "HYPERSONIC FIELD II" OR "The effects of a hypersonic field" OR "INTENSE HYPERSONIC FIELD" OR "HYPERSONIC FIELDS IN SOLID-STATE WAVEGUIDES" OR "longitudinal hypersonic\*")) OR (("hypersonic expansion\*") NOT ("Hypersonic Expansion Flows\*" OR "hypersonic expansion tube\*" OR "hypersonic expansion corner\*" )) OR ("hypersonic-velocity impact ionization") OR ("hypersonic probe\*") OR ("hypersonic gas jet\*") OR ("Gardeniae Fructus") OR ("hypersonic focus") OR ("Adverse childhood experience") OR ("water immersed carbon nanotubes") OR ("impact ejecta") OR ("Sleep disorders") OR ("High pressure ultrafast acoustic spectroscopy technique") OR ("EUV") OR ("meteoroid" NOT "Thermal Protection") OR ("hypersonic grating\*") OR ("Er2O3") OR ("Liquid Crystal Sensor\*") OR (("fireball\*" OR "earthquake" OR "volcanic eruption" OR "Coronal" OR "seismic" OR "cometary") NOT ("Genesis" OR "HAYABUSA" OR "InSight Mars Lander")) OR ("phononic crystal slab\*") OR ("hypersonic frequencies" OR "hypersonic frequency") OR ("hypersonic (GHz) range" OR ("hypersonic range\*" AND "GHz")) OR ("Hypersonic attenuation\*") OR ("hypersonic phonon\*") OR ("Hypersonic delay line\*") OR ("hypersonic spectrometry\*") OR ("hypersonic\*" AND "acoustic pulse\*" NOT "Mach") OR ("Laser hypersonics") OR ("Hypersonic surface-spectroscopy\*") OR ("Raman spectra\*" NOT "Tunnel\*") OR ("Laser-Desorbed Matrix Ions") OR ("hypersonic strain wave") OR (("impactor\*" OR "impaction\*") NOT "vehicle\*") OR ("Hypersonic Behavior\*") OR ("Hypersonic Properties") OR ("CDCL2") OR ("Aqueous Electrolytic Solution\*") OR ("Hypersonic Bolometer\*") OR ("Vibrational Relaxation In Benzene\*") OR ("resonator\*" NOT ("mach" OR "vehicle\*")) OR ("hypersonic plasma particle deposition\*"))