

# 高马赫数飞机生命保障系统设计研究进展

周 健<sup>1</sup>, 陈 龙<sup>1</sup>, 吴小华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国航空工业集团有限公司, 中国航空研究院, 北京

<sup>2</sup>南昌航空大学飞行器工程学院, 江西 南昌

收稿日期: 2024年7月2日; 录用日期: 2024年7月23日; 发布日期: 2024年8月6日

## 摘 要

高马赫数飞行技术的发展对飞行员的生命保障系统提出了新的挑战。本文旨在基于现有研究技术下探讨在极端高速飞行条件下, 保障飞行员生命安全和身体健康的关键技术的研究进展。本文首先对高马赫数飞行器飞行条件下对人体生理的影响进行了探讨; 随后, 概述了高马赫数飞行器的典型飞行特征以及面对高空、低压、高马赫数飞行环境下生命保障系统设计应当具备哪些基本需求; 最后, 综合研究了高马赫数飞行条件下生命保障的设计在当下有哪些进展与突破。此外, 本研究对现有高马赫数飞机生命保障系统进行了总结, 提出高马赫数飞机生保技术路线图进行研究, 以进一步提高高马赫数飞行器生命保障技术的性能和可靠性。

## 关键词

高马赫数飞机, 生命保障技术, 故障预测与健康管理, 高温材料

# Discussion of Life Support Techniques for High Mach Number Aircraft

Jian Zhou<sup>1</sup>, Long Chen<sup>1</sup>, Xiaohua Wu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Aviation Industry Corporation of China, Chinese Aeronautical Establishment, Beijing

<sup>2</sup>Nanchang Hangkong University, College of Aircraft Engineering, Nanchang Jiangxi

Received: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2024; accepted: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2024; published: Aug. 6<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The development of high Mach number flight technology poses new challenges to the life support system of pilots. The purpose of this paper is to explore the research progress of key technologies to safeguard pilots' life safety and physical health under extreme high-speed flight conditions based on existing research technologies. This paper firstly discusses the impact on human physi-

ology under the flight conditions of high Mach number vehicles. Subsequently, it outlines the typical flight characteristics of high Mach number vehicles and the basic needs for life support technology design in the face of high-altitude, low-pressure, and high Mach number flight environments. Finally, it comprehensively investigates what advances and breakthroughs have been made in the design of life support under the flight conditions of high Mach number. In addition, this study summarises the existing high-Mach aircraft life support system and proposes a roadmap for high-Mach aircraft life support technology to be studied in order to further improve the performance and reliability of high-Mach aircraft life support technology.

## Keywords

High Mach Number Aircraft, Life Support Technology, The Failure Prediction and Health Management Systems, High Temperature Materials

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

高马赫数飞行器作为航空航天技术的战略发展方向,是各大国竞相追逐的制高点。目前,高超声速技术大都集中应用于军事领域,在洲际导弹、载人飞船、航天飞机等方向取得了 20 余倍声速的速度突破[1],并展现出巨大的实用价值。这一特征符合高新技术的发展和规律,也昭示了向更为广阔的民用领域,尤其是向高超音速客机、空天旅游等商业航空航天活动延展的可能性[2]。实现可重复使用飞机的高马赫数载人飞行,全速域座舱环境控制与生命保障技术是亟待突破的关键问题之一[3]。传统亚音速及超音速飞机( $Ma \leq 3.0$ )环控生保技术已经取得了长足的技术进展并实现了成熟可靠的工程应用[4],当前对于飞机飞行过程中如何保障飞行员个体生命安全领域的研究,重点关注高马赫数( $Ma \in [3, 6]$ )飞机的生命保障问题。

目前,我国暂无关于可重复使用载人高超飞机发展计划的公开报导,但欧美航空强国均高度重视这一高技术领域的发展,且取得了一定的成绩[5]-[7](如表 1 所示)。国外开展了多种型号的高马赫数飞机飞行试验,其中 SR-71 [8] [9](如图 1 所示)是一款完成多次载人飞行的水平起降飞机,取得了高马赫数飞机环控生保系统的技术突破。

**Table 1.** Overview of the development of high Mach number vehicles

**表 1.** 国外高马赫数飞行器发展概况

事件时间	国家/地区	产品	飞行速度	研究概况
2020 年 8 月	赫尔缪斯公司(美国)	客机	Ma4~Ma5	拟实现载客 20 人左右、航程 4000 海里(约合 7400 公里)
2021 年 2 月	Aerion 公司(美国)	新型超音速客机	Ma4 以上	在未来 10 年内首飞,可搭载 500 名旅客飞行 7000 英里(合 11265 公里)在 1 小时内从纽约飞到伦敦
2020 年	欧盟(科研基金)	高超声速民用飞机	Ma5~Ma8	项目启动,正陆续开展了一系列气动、材料、结构、推进等技术研究
2015 年	日本和欧洲	高超声速客机	Ma5 以上	研究目标是 2045 年前后完成 100 座机 Ma5 高超声速客机研制
2013 年	俄罗斯	高马赫数战斗机	Ma4 以上	改型米格-41 的设计工作



Figure 1. SR-71 high Mach number vehicle [8] [9]

图 1. SR-71 高马赫数飞行器[8] [9]

高马赫数飞行器，特别是军用和民用的高速飞行器，面临着极端的环境条件，包括高温、高压和高速气流，如何保障驾驶员生命安全的措施尤为重要。高马赫数飞机在恶劣的环境下运行时极易对生命个体造成一定的伤害，因此面对高马赫数飞机生命个体保障技术的革新与研制，对飞机的结构完整性、乘员安全以及系统的可靠性和效率等方面提出了极高的要求。因此，设计一个有效的生命保障系统(Life support systems, LBS)对于确保飞行安全和乘员生存至关重要。

尽管已有研究在生命保障技术方面取得了一定的进展，但在高马赫数飞行条件下，如何有效地保障飞行员的生命安全和身体健康仍然是一个亟待解决的问题。本文旨在探讨高马赫数飞行器在恶劣飞行条件下如何进行生命保障系统的设计，本文主要分为三个部分：第一，从人体生理特征因素和环境控制因素等研究并探讨高马赫数飞行环境对生命保障技术研制的参考价值；第二，高马赫数飞行器的典型飞行特征对高马赫数飞行条件下生命保证技术的需求与研究；第三，高马赫数飞行条件下生命保障系统设计的技术研究，需要综合考虑结构材料选择、故障预测与健康管理系统、综合飞行器健康管理系统、个体生命保障系统以及安全增强系统等多个方面，以期为未来的研究和实践提供参考。

## 2. 高马赫数飞行环境对人体生理的影响

### 2.1. 大气环境与空间环境的影响

人体生理学要求对载人航空航天活动的环境参数提出了明确要求，而且在高层大气所发生的各种自然现象，都直接或间接地与人类活动有着密切的关系，所以对其构造及基本特征应有一个完整的了解[10]。把大气看作是分别由若干各具特点的同心层所组成。目前比较广泛应用的是以各层的温度特性为依据，即将地面向上的大气各层分为对流层、平流层、热层和外逸层。

对流层：从地面开始至垂直对流特征消失的高度，最高顶高可达 16~17 km；空气对流，温度随高度向上按照  $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$  递减率递减。

平流层：从对流层顶至 80 km 高度的平流层顶之间为平流层；平流层低层至 20 km 为同温层，热量的吸收与发散相等，温度基本不随高度变化，保持为  $-56.5^{\circ}\text{C}$ 。在 20 km 以上的高度，由于臭氧的存在和消失，温度逐渐上升，升至 50 km 温度可达  $-2.5^{\circ}\text{C}$ ，尔后又逐渐降低至 80 km 的  $-74.5^{\circ}\text{C}$ 。

热层：从距地面 80 km 到 800 km 高度这一层；空气高度电离，大气极稀薄，温度随高度逐渐增加，温度在  $1000^{\circ}\text{C}\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 。

大气从地球表面延伸的距离取决于两个对立的因素，即太阳的热辐射和地球的引力。太阳的热辐射使大气中的气体向周围外层空间扩散，而地球的引力则将气体拉向地球表面，因此大气的密度和由此而

产生的压力随着从地球表面向外层空间的升高而逐渐减少。密度和压力都随高度增加呈指数函数下降[11]。但由于不同高度上温度的变化，压力和密度的下降，与真正指数的变化规律存在着微小的差别。目前通行的国际标准大气是按中纬度地区的平均气象条件制定[12]。温度在大气各层存在一定的差异和随高度变化的规律。

## 2.2. 高马赫数飞行器飞行活动对人体影响

高马赫数飞行器的飞行活动对人体有显著影响，高马赫数飞行会导致心率变化、心肌细胞损伤和心律失常等生理变化[13]。长期航天飞行还可能对航天员的大脑和视觉造成损害，症状与普通颅内高压患者类似[14]。另外，高马赫数飞行环境还可能影响心肺功能，导致飞行员出现抑郁症等心理问题[13]。高马赫数飞行器的飞行活动对人体有多方面的负面影响，需要通过多种防护措施来减轻这些影响。

为了减轻高马赫数飞行对肺功能的影响，在高亚声速马赫数下运行时，气动力装置的效率最高；因此，通过优化飞机的气动设计，可以在一定程度上减少对肺部的冲击和压力。另外，由于空气与飞机表面摩擦产生的热量急剧增加，需要采取隔热措施来保护飞行员的身体，隔热措施不仅有助于防止热伤害，也能间接减轻因高温引起的生理负担。

长期处于低气压下进行高强度活动会导致人体的缺氧。随着海拔高度的增加，大气压力下降，大气中的氧分压和肺泡空气中的氧分压也相应降低[15] (如图 2 所示)，血液中的氧气饱和度减少，这样在一定条件下就会导致机体缺氧[16]；习惯上用表 2 的高度数据来表征人体的缺氧症状与危险程度。另外，随着高空高马赫数飞行下大气压强的不断降低，随之会不断出现低压效应，会对人体产生高空胃肠气胀、高空减压病等不良反应[17]；以高度而论，这相当于由海平面上升到 5.5 km。实际上，根据各国大量资料，可作如下概括：在 5.5 km 高度发生减压病者，仅属个例，少数发生在 6~7 km 以上，多数发生在 8 km 以上[18]。由于高空高马赫数飞行下大气减压速率非常快，多在几秒或几分之一秒内即完成的座舱压力急剧降低，该过程称为“爆炸减压”或“迅速减压”[18] [19]。爆炸减压对人体有致命的危害，会导致爆发性缺氧、气胀性损伤和机械性外伤等等[18]-[20]。

热湿环境对人体也有较大影响。高温负荷可引起一系列生理变化：使汗腺活动增强并使体温上升；引起心输出量增加及皮肤血管扩张又使心率加快等[21]。如环境温度升高超过人体所能调节的能力，则出现体内“热积”。当热积为 127、203、305 kJ/m<sup>2</sup>时，机体会分别处于 I、II、III 度不适状态，直肠温度分

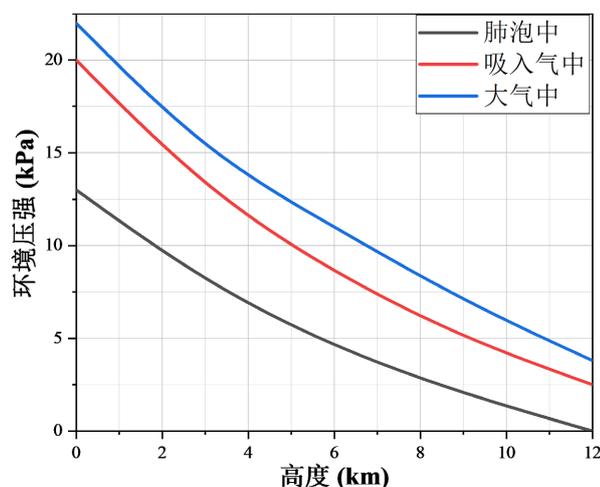


Figure 2. The human body's reaction to oxygen [15]

图 2. 人体对氧气的反应[15]

**Table 2.** Oxygen compensation characteristics as a function of altitude  
**表 2.** 氧气代偿特征随高度的关系

区别	高度 h (km)	
	吸入氧气	吸入空气
无症状	10~12	0~3
代偿	12~13	3~5
障碍	13~14	5~7
危险	14 以上	7 以上

别为 37.5℃~37.8℃、37.8℃~38.0℃和 38.0℃~38.6℃ [22]。临床观察表明,当直肠温度为 40℃时,体温调节机制已失去作用,出汗停止,如不采取措施体温将迅速上升,当上升到 43.5℃左右时,人即死亡[23]。

高超声速飞行时的座舱减压、臭氧浓度增加、高温负荷以及宇宙粒子辐射危害的影响和防护是有待研究解决的航空生理学问题。需要综合考虑大气及空间环境、飞行状态等参数确定高马赫数飞机的生命保障系统设计。

### 2.3. 环境控制与生命保障要求

座舱内的压力要求主要根据人体生理需求以及飞机结构限制对座舱高度、压差、压力变化速度及压力制度所提出的相应要求[24]。飞机座舱高度是指座舱内绝对压力值所对应的高度,为了保证旅客和空勤人员正常生活和工作能力[25],并减少飞机上升或下降所引起的压力变化速度对人体的影响,座舱高度最好始终保持与地面一样,但这样会使飞机结构质量增加,同时会增大飞机结构损坏时所造成的爆炸减压的危险性[26]。为此,根据人体生理卫生允许的标准制定座舱高度。对军用机,当续航时间小于 4 h (如战斗机),座舱高度不超过 8 km;当续航时间大于 4 h (如轰炸机),座舱高度不超过 7 km [27]。

座舱压差是指座舱内压力与外界大气压力的差值。对战斗机,应考虑到在最大飞行高度上,当座舱失去气密时(例如座舱爆炸),舱内外的压力差不致给飞行员造成破坏性损伤[28]。前苏联、英、法等国的生理实验得出 29.4 kPa (0.3 kg/cm<sup>2</sup>)是最合适的压差值,最大不要超过 32.4 kPa (0.33 kg/cm<sup>2</sup>);美国则认为最适宜值应为 34.5 kPa (5lb/in<sup>2</sup>) [29]。飞机爬升和下降,发动机供气量的变化等都会使座舱压力发生变化。包括瞬态条件在内的所有正常工作状态时,对歼击机、轰炸机,压力降低速度每秒不超过 0.67~1.33 kPa (5~10 mmHg);压力增加速度每秒不超过 0.40~0.67 kPa (3~5 mmHg) [30]。

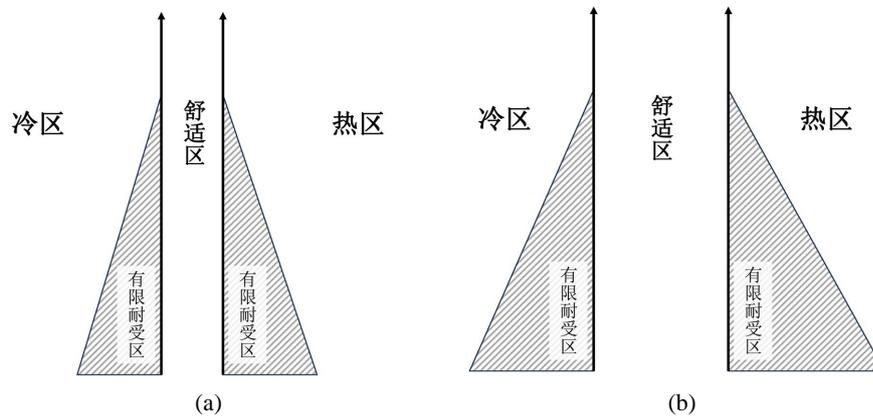
在周围环境温度为+35℃到-75℃的条件下,驾驶舱的空气温度应保持在 15℃~26℃的舒适区范围内,当穿有通风服等特殊服装时其范围可扩大到 10℃~37℃ [31],参见图 3。但当地面气候条件对舒适温度有不同的要求,长期在冷环境下工作的人员乘机时,舒适温度要求偏下限,而在热环境下的则偏上限。输入座舱内热空气最高温度对军用机座舱不能大于 75℃~80℃,但无人住的舱段可允许达到 93℃ [32]。

## 3. 高马赫数飞行器的典型特征与生命保障技术

发展高马赫数飞机生命保障技术,既需要参照作战飞机的环控生保系统设计理念,更应针对当前面临的降低能耗、减轻重量等要求,突破传统设计思维,参照国内外相关领域的优势技术(如载人航天技术),结合高马赫数飞机不超过 4 小时的航程特征[35],确定一套能量消耗少、工作可靠性高、维护要求低的生命保障技术路线。

### 3.1. 高马赫数飞行器典型的飞行包线与技术特征

根据现有文献调研的高马赫数飞行器典型飞行包线[36]可知,高马赫数飞行器通常需要在较宽的速度

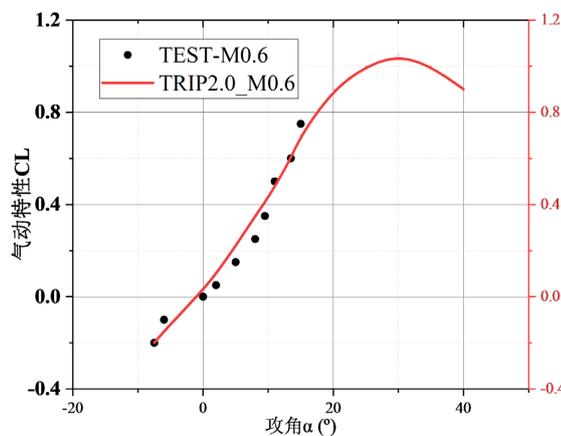


**Figure 3.** Temperature requirements for hermetic chambers [33] [34]. (a) Temperature requirements for airtight compartments of aircraft [33]; (b) Temperature requirements for airtight cockpits for normal use of containment suits [34]

**图 3.** 气密舱的温度要求[33] [34]。(a) 飞机气密舱的温度要求[33]；(b) 正常使用密闭服对气密座舱温度要求[34]

范围内工作，其飞行高度也受到了一定的限制，某型号超燃冲压发动机的飞行高度上限可以达到 45 千米 [37]。随着飞行速度的增加，启动特性的变化会非常剧烈，当马赫数  $Ma = 5$  时，气体总温可达 1800 K，对于发动机运转而言，较高的进口温度意味着更高的涡轮前温度，毫无疑问将导致高速飞行过程中启动加热更加剧烈，这要求飞机材料和结构性能更高。为保证高马赫数飞行器在宽广的飞行包线下正常运行，需要先进的控制技术[38]，其控制规律还需要考虑高马赫数、宽飞行包线和气体反应时的剧烈变化。

另外，通过对高马赫数下飞行器飞行包线的研究。可以总结出以下气动特性：随着马赫数的增加，升阻比逐渐减小，其最大升阻比的位置也有所不同；在 40 km 高度飞行时，最大升阻比出现在约  $10^\circ$  的攻角左右，并且在马赫数 2 到 18 之间，最大升阻比约为 4 [39]；在相同的攻角下，阻力系数随马赫数的增加而增加，达到最大值后会随马赫数增加而减少[40] (如图 4，气动特性随攻角的变化[40])。



**Figure 4.** Variation of pneumatic characteristics with the angle [40]

**图 4.** 气动特性随攻角的变化[40]

### 3.2. 高马赫数飞行器生命保障系统的需求

设计生命保障系统以最大限度地减少高马赫数飞行中的过载对飞行员的影响尤为重要；需要综合考

虑多个方面的技术与措施。

抗荷动作是飞行员在过载发生时主动对抗过载的防护性动作，如 M-1 和 L-1 动作以及 HP 动作可以提高飞行员的耐力[41]。此外，对抗荷服进行充气膨胀挤压飞行员的腹部和下肢，防止血液向下肢流动，从而避免或减轻黑视、昏厥等情况[42]。飞行员使用抗荷服的情况下，当在座舱失去气密性或弹射离机时，对飞行员的躯干及下肢施加压力进行代偿保护。现有文献研究中，采用新型管式抗荷服[43]，并结合压力降低装置和压力排放阀等技术，可以进一步提升抗荷服的性能。该设计可以在高过载情况下提供更好的保护，确保飞行员的安全。

由肖华军等的研究表明，给飞行员配上加压呼吸装备可以进一步提高其正过载耐受能力[44]，加压呼吸装备可以通过增加氧气供应来帮助飞行员在高过载情况下保持清醒和稳定。采用大后倾角座椅(如 F-16 的后倾高达 30°)可以改变反作用力的方向，从而缓解飞行员承受的过载[45]，大后倾角座椅设计有助于减少飞行员在高过载情况下的不适感。实时生理监测技术可以动态精确测量飞行员在高过载情况下的生理指标，如头眼水平血流动力学、脑电、脑氧代谢、心电和肌电等[46]。结合无线传感技术和人工智能科技，可以及时发出预警，提醒飞行员采取措施，从而有效预防 G-LOC 的发生。

基于数据共享、控制融合的飞管平台以及氧气介质传感器技术，开展数字协同环境下生命保障系统的综合设计，具备高度综合的全数字显示与控制、自主诊断和状态监测能力[46]。这不仅提高了系统的电子化程度，还获得了高效的维修保障能力，为实现快速出动、快速布防、跨区域作战提供了有力支撑。

#### 4. 高马赫数飞行下生命保障技术的技术研究

基于系统工程的需求/功能分析方法，从飞机可靠性、可用性、可维护性、安全性、经济性、环境适应性和飞行任务等需求出发，提出系统需求，并开展需求分析向工程实践转化研究[47]。生命保障系统的研制在系统工程材料领域的开发中，进一步确保了生命保障系统能够满足高马赫数飞机特殊需求并确定了其基础地位。考虑到高马赫数飞行器在高速飞行时会遇到的极端温度和压力，选择合适的结构材料和设计是至关重要的。例如，热防护系统(TPS)的设计必须能够承受由高速气流引起的气动加热效应，以保证机体结构温度在可承受的范围内[48]。为了确保飞机的高可靠性、高安全性和高维修保障性，大型飞机机载系统装备了先进的故障预测与健康管理系统(PHM)系统[49]。这种系统通过实时监控飞机的健康状态，预测潜在的故障，并提供维修决策支持，从而提高了飞机的可靠性和安全性。

飞行器综合管理技术(IVHMS)在提高飞行器的安全性、降低飞行成本等方面具有重要作用。它涉及到一系列活动，包括信号处理、监测、健康评估、故障预测、决策支持等[50]。这种综合管理系统的实施对于高马赫数飞机尤为重要，因为它们需要在复杂多变的环境中保持高效运行。为飞机乘员配备的专用个体防护装备是保证乘员在高速飞行环境下各项生命状态正常的重要保证[51]。新型生命保障系统对飞行员离心机模拟空战动作的防护效果表明，这些系统能够有效保护乘员免受极端条件的影响[42]。设计安全增强系统以防止入侵到禁飞区等静态外部危险中，当风险最紧迫时，系统特征自动故障安全[52]。这种系统通过多种通信方式(视觉、听觉和触觉)提高飞行员的风险意识和接受度，从而显著提高飞行安全性。

##### 4.1. 高马赫数飞机在高温高压环境下的结构材料选择

在高马赫数飞机的结构材料选择方面，最新的研究主要集中在耐高温、高强度和轻质材料的发展上。超高温材料(UHTMs)这类材料具有独特的综合性能，适用于极端环境，如长时间的超音速飞行、载入飞行和火箭推进[53]。这类材料包括耐火金属、陶瓷基复合材料和碳/碳复合材料。另外，高温透波陶瓷材料主要用于高马赫数飞行器的天线罩和雷达天线窗等关键部件。目前的研究方向包括高性能多元氮化物

陶瓷和连续纤维增强氮化物基陶瓷,以解决介电性能和机械性能难以协同、透波性能和隔热性能矛盾及成型加工困难等问题[54]。陶瓷基复合材料也是航空发动机所用耐高温材料的重要组成部分,其研究进展包括高温合金防护涂层的研究[55]。

高温合金材料与高温复合材料具有耐高温性能、力学性能、抗氧化和抗腐蚀性能等优势,通过持续的研究和技术创新,高温合金和高温复合材料的优势正在不断被挖掘和利用。高温合金材料包括定向凝固和单晶合金用于叶片和叶片应用,锻造合金用于航空发动机盘和环,以及粉末冶金合金用于高性能盘应用[56]。材料因其高比强、高比模、耐高温和耐疲劳等优点,在飞行器热防护系统设计中得到广泛应用。国外典型高马赫飞行器的应用情况、试验研究和仿真分析研究进展表明,这些材料对于国内飞行器高温复合材料结构的发展具有重要的借鉴意义[57]。

#### 4.2. 故障预测与健康管理系统的应用效应

故障预测与健康管理(PHM)系统在高马赫数飞机上的应用案例和效果评估可以从多个角度进行分析。PHM系统的核心功能包括状态监测、异常检测、原因诊断、剩余使用寿命(RUL)预测以及维护优化[58]。这些功能对于高马赫数飞机的运行至关重要,因为这类飞机通常面临极端的工作条件和环境挑战。

从技术实现的角度来看,PHM系统的成功应用依赖于高级的数据处理和分析技术。例如,一种基于小波算法和深度自编码器的方法被用于大规模民用航空发动机系统的PHM系统中,以去除噪声并提取关键特征[59]。此外,马尔可夫距离技术用于基于状态转移概率评估健康状态,这有助于实时评估和预测,从而实现早期异常状态检测和及时行动[60]。在实际应用方面,PHM系统已经在多种航空系统中得到部署。例如,在集成模块化任务系统中,提出了一个分层的PHM架构,该架构在子系统级别和系统级别上分别开发了集成条件监测方法和基于模型推理(MBR)引擎及其诊断知识模型[61]。这种设计方法不仅提供了集成的健康状况监测和准确的故障诊断,还为飞行员和维护人员提供了实时和全面的健康信息。

关于效果评估,PHM系统的实施显著提高了飞机的可靠性和安全性。通过预测性维护框架,可以比较传统预防性维护与预测性维护的效果[62],其中预测性维护框架在总维护成本和任务可靠性方面显示出更好的性能。此外,PHM系统的使用还可以支持优化的飞机维护计划,通过结合系统架构信息和所有组件的RUL估计,支持关于更换多个组件的维护决策[63]。

#### 4.3. 综合飞行器健康管理系统的效应

综合飞行器健康管理系统(IVHMS)的设计原理主要基于对飞行器在飞行和地面操作中的健康状态进行实时监控和管理,以提高飞行器的安全性、可靠性和维护效率。IVHMS通过集成先进的传感器技术、数据处理和分析能力以及自动化的维护程序,实现了对飞行器健康状况的全面管理和预测[64]。

在实际应用中,IVHMS已经在全球多个航天项目中得到应用,如Space Shuttle、Deep Space-1、X-33、X-34和X-37等[65]。这些应用表明,IVHMS能够显著降低运营成本,减少地面处理时间,并提高飞行器的安全性和可靠性。例如,通过在飞行中进行更多的系统健康检查,减少了返回地面后的处理工作量,同时增强了通过现代传感系统监测系统健康的能力,即使是在发动机燃烧室这样恶劣的环境中也能有效工作[65]。

此外,IVHMS还支持使用商用现成的飞机条件监测系统(ACMS)硬件,如数字飞行数据采集单元(DFDAU)[66],这不仅支持关键的健康管理功能,还能通过实时事件转发或记录任何参数/离散数据来优化IVHMS操作。这种集成化的健康管理框架还能够为全球运行的飞机提供集成的健康管理,监控飞行中的健康状态,以便建立适当的机制来管理实时故障诊断、故障预测以及智能维护决策[67]。然而,尽管IVHMS在理论上具有许多优势,其实际部署和应用仍面临一些挑战,如系统的复杂性、成本效益、互操

作性以及系统寿命要求等问题。此外，随着技术的发展，IVHMS 需要不断适应新的技术和市场需求，例如利用人工智能技术来增强故障检测和维护决策的支持。

#### 4.4. 新型个体生命保障系统与安全增强系统

在高马赫数飞行环境下，新型个体生命保障系统能够在地面至 18.0 km 高度提供足够的供氧，满足飞行员在不同飞行高度的需求。这表明系统具备良好的适应性和可靠性，能够在极端环境下保持供氧稳定[68]。另外，该系统的供氧性能在技术细节方面还包括正常供氧时的供氧分压大于 21.0 kPa，以及在加压供氧时总压大于 16.0 kPa。这些参数确保了飞行员在高空飞行时能够获得足够的氧气，避免因缺氧导致的生理问题。

新型个体生命保障系统在飞行高度 8.0 km 以下的供氧浓度偏高，这可能需要进一步的设计改进以优化供氧效率和安全性。这种设计上的不足可能会影响到系统的整体性能和飞行员的安全。考虑到高马赫数飞行环境的特点，如高速产生的热负荷和压力变化，新型个体生命保障系统还需要具备高效的热管理和压力调节能力。例如，基于冷热电一体化的舱外航天服生命保障系统展示了如何通过高效的能源利用和热管理来应对极端环境。这种技术的应用可以为高马赫数飞行环境下的生命保障系统提供参考。

从飞行控制系统的角度来看，高马赫数飞行器的设计需要考虑到飞行品质和安全性。例如，通过设计攻角限制器来改善大型飞机的飞行品质，这可以有效地控制飞机的飞行状态，避免进入不安全的飞行区域[69]。此外，对于高马赫数飞行器，采用先进的弹道优化方法，如基于改进直接打靶法和自适应遗传算法的混合优化方案，可以在满足多种约束条件下，找到最优的飞行轨迹，从而有效规避禁飞区。

从技术安全设备的角度来看，对于飞机的安全性增强还包括对飞机电子系统的保护。例如，技术安全设备(TSE)的设计需要考虑对故意电磁干扰的稳定性，这对于确保飞机在复杂环境下的正常运行至关重要。从测试方法的角度来看，传统的飞行测试方法可能需要大量的测试矩阵，而使用统计设计实验的方法可以显著减少所需的测试量，提高数据分析的质量，并提供对系统性能的更多洞察。这种方法的应用可以帮助更精确地评估安全增强系统的效果。从实际应用的角度来看，尽管有时会发生飞机误入禁飞区的情况，但通过持续的技术改进和严格的安全措施，可以大大降低此类事件的发生概率。例如，欧洲空中交通管理行业采用“设计内安全”的方法，从开发生命周期的开始就应用安全评估，这有助于提前识别和解决潜在的安全问题。

### 5. 高马赫数飞机生命保障技术发展展望

面向未来，要发展好高马赫数飞机生保技术，首先需要在收集前人研究成果的基础上，利用已有的实际资料，对现役的先进战斗机的环控生保系统进行分类，进行概念化处理，归纳出相应的特点。在此基础上，进一步分析各个类型的环控生保系统的各功能原理特点，把握未来的一个发展趋势，以及现在处于研究阶段的，未来可实现的研究成果。同时借鉴现在的航天方面的环控生命保障系统，如神舟飞船、载人航天器以及现阶段各个国家的空间站，借鉴一些处于前沿技术的研究成果，尝试将其用于高马赫数飞行器上。

由于高马赫数飞行器目前可直接参考的资料很少，并且期处于前沿研究，针对目前的困难性，研究工作需要将机理的研究与高马赫数飞行器评价预测紧密结合，从机理研究的角度探讨高马赫数飞行器生保系统评价和预测的基本途径。另外通过对高马赫数飞机在高温高压的条件下进行了简要探讨，从高温高压故障预测与健康管理系统对飞行员的重视程度，从飞行器新型的个体生命保障系统的应用效应，从高马赫数飞行条件下如何保证生命个体的安全问题，因此本文重点研究并提出了以下几个问题是目前需要解决的：飞行员的安全、飞机的应急救生、座舱内的环境控制问题和座舱的密闭性，以及实施的可行性。

性等。

高马赫数飞机生命保障技术是一个崭新的研究领域,面向国家科技前沿,是进行高马赫载人飞行的关键,目前处于世界研究的前沿。本研究对现有高马赫数飞机生命保障系统进行了总结,借鉴了航空和航天生命保障系统的现有技术,分析高马赫数在高温高压飞行条件下,飞行器结构材料的选择、故障预测与健康管理系统、个体生命保障系统的应用效应等等,提出了高马赫数飞机生命保障技术发展展望,为未来实现高马赫数飞机生命保障系统的研制提供参考。

## 参考文献

- [1] 陈宣亮, 曾军, 李刚团, 等. 高马赫数飞行器飞/发性能一体化评估方法初步研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 35(1): 16-22.
- [2] 美国超音速客机研制历程[J]. 科学大观园, 2016(12): 33-35.
- [3] Abdulrahman, G.A.Q., Qasem, N.A.A., Imteyaz, B., Abdallah, A.M. and Habib, M.A. (2023) A Review of Aircraft Subsonic and Supersonic Combustors. *Aerospace Science and Technology*, **132**, Article ID: 108067. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.108067>
- [4] 朱铮, 韩寒, 刘长明. 飞机乘员生命保障系统的研发过程[J]. 中国个体防护装备, 2016(3): 48-50.
- [5] 程归, 杨广, 郭宏伟, 等. 高超声速变体飞行器关键技术研究综述[J]. 航空科学技术, 2024, 35(5): 28-44.
- [6] Ding, Y., Yue, X., Chen, G. and Si, J. (2022) Review of Control and Guidance Technology on Hypersonic Vehicle. *Chinese Journal of Aeronautics*, **35**, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.10.037>
- [7] Duan, H. and Li, P. (2012) Progress in Control Approaches for Hypersonic Vehicle. *Science China Technological Sciences*, **55**, 2965-2970. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-5036-x>
- [8] Corda, S., et al. (1998) Flight Testing the Linear Aerospike SR-71 Experiment (LASRE). NASA.
- [9] Corda, S., et al. (2000) The SR-71 Test Bed Aircraft: A Facility for High-Speed Flight Research. NASA.
- [10] 邵文毅. 非均匀湍流路径下大气分层特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2016.
- [11] Schiffner, I. and Srinivasan, M.V. (2016) Budgetary Flight in a Varying Environment: Flight at Distinct Speeds? *Biology Letters*, **12**, Article ID: 20160221. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0221>
- [12] Dai, Y., Zhang, P., Ito, K., Noda, K. and Senge, M. (2020) Clarification of the Necessary Meteorological Conditions to Control *Ralstonia Solanacearum* via Soil Solarization. *Paddy and Water Environment*, **18**, 667-676. <https://doi.org/10.1007/s10333-020-00809-4>
- [13] 蓝小华, 曹艳杰, 任启涛, 等. 飞行员心肺储备功能与抗荷耐力关系的研究进展[J]. 心脏杂志, 2023, 35(2): 196-199.
- [14] 专题报道: 国外载人航天新进展[J]. 中国航天, 2024(4): 6.
- [15] 韩学平, 梁丽萍, 于立华, 等. 飞行员缺氧训练监测要求与技术的探讨[J]. 空军医学杂志, 2019, 35(1): 18-19, 56.
- [16] 吴建兵. 飞行人员缺氧体验训练效果观察及训练方法的探讨[D]: [硕士学位论文]. 西安: 第四军医大学, 2008.
- [17] Nikhare, C., Weiss, M. and Hodgson, P.D. (2009) FEA Comparison of High and Low Pressure Tube Hydroforming of TRIP Steel. *Computational Materials Science*, **47**, 146-152. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.06.024>
- [18] 王刘杰, 徐水红, 王东阳, 等. 航天爆炸减压舱的设计与实现[J]. 航天医学与医学工程, 2021, 34(2): 161-165.
- [19] 卢剑锋, 杨鹏, 王桂友, 等. 低压迅速减压舱减压平衡的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(9): 801-807.
- [20] Llop, M.F. and Jand, N. (2003) The Influence of Low Pressure Operation on Fluidization Quality. *Chemical Engineering Journal*, **95**, 25-31. [https://doi.org/10.1016/s1385-8947\(03\)00079-2](https://doi.org/10.1016/s1385-8947(03)00079-2)
- [21] He, Y., Wang, X., Li, N., He, M., He, D. and Wang, K. (2017) Cooling Ceiling Assisted by Desk Fans for Comfort in Hot-Humid Environment. *Building and Environment*, **122**, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.037>
- [22] Chen, G., Xu, P., Mi, G. and Zhu, J. (2019) Compressive Strength and Cracking of Composite Concrete in Hot-Humid Environments Based on Microscopic Quantitative Analysis. *Construction and Building Materials*, **225**, 441-451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.170>
- [23] Aditya, S., Bahutala, M.B., Hibatullah, D.N., Pourazad, P., Wahyono, T., Kumar, M., et al. (2023) Evaluation of Milk Yield and Composition, Feed Intake, Chewing Activities, and Clinical Variables in Dairy Cows under Hot-Humid

Climate of Tropical Zone. *Journal of Thermal Biology*, **114**, Article ID: 103608.

<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2023.103608>

- [24] 杨春明. 波音 737-800 飞机座舱高度速率指示摆动故障分析[J]. 航空维修与工程, 2017(11): 83-85.
- [25] 窦艳玲, 冯怀志, 刘涛, 等. 飞机座舱压力高度突变对机组人员的中耳功能及听力的影响[J]. 西南国防医药, 2018, 28(10): 970-971.
- [26] 白杰, 陈希远, 杨建忠, 等. 飞机座舱失压模拟仿真研究[J]. 中国民航大学学报, 2014, 32(6): 1-6.
- [27] 陈希远. 飞机座舱环控事故分析与模拟仿真系统研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2014.
- [28] 刘伟. MA600 座舱空调系统的常见故障解析[J]. 科技创新与应用, 2016(29): 53-54.
- [29] Zhang, T., Dong, J. and Liu, S. (2022) Modeling and Measuring the Leaked-Air Rate into the Insulation Layer of a Single-Aisle Aircraft Cabin. *Buildings*, **12**, Article 652. <https://doi.org/10.3390/buildings12050652>
- [30] 李建海, 何青洋, 孙艳丽. 基于 GL Studio 的航空虚拟仪表设计[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(5): 999-1002.
- [31] 朱君强. 某型飞机座舱温度调节系统故障分析及预防维护措施[J]. 设备管理与维修, 2024(6): 85-87.
- [32] 杨智, 龙正伟, 汪光文. 民用飞机座舱温度场仿真分析与研究[J]. 制冷与空调(四川), 2020, 34(3): 312-315, 325.
- [33] 邓林. 关于空客 A330 飞机座舱温度控制系统原理及故障处理分析[J]. 科学技术创新, 2020(30): 28-29.
- [34] 周毕云, 丁立, 张静, 等. 高空飞行密闭舱的结构和关键技术分析[J]. 科技导报, 2023, 41(21): 6-13.
- [35] 姚彦龙, 谢凡. 高马赫数飞机全剖面航程性能估算方法[J]. 飞机设计, 2021, 41(3): 23-29.
- [36] Wang, J. (2021) Aeroengine High-Attitude/Low Mach Number Oscillations: Mechanism and Prevention Design. *International Journal of Aerospace Engineering*, **2021**, Article ID: 8881951. <https://doi.org/10.1155/2021/8881951>
- [37] 刘小勇, 王明福, 刘建文, 等. 超燃冲压发动机研究回顾与展望[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 218-244.
- [38] 杨庶, 钱云霄, 杨婷. 高超声速飞行器线性变参数一体化式控制律设计[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(11): 1427-1437.
- [39] 程云鹏, 闫晓东, 程锋. 基于气动性能分析的高超声速滑翔飞行器轨迹估计[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(6): 1102-1110.
- [40] 王运涛, 张玉伦, 王光学, 等. 三角翼布局气动特性及流动机理研究[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(5): 554-558.
- [41] 严共鸣, 赵德春, 杨安元. 基于飞机抗荷调压器性能检测的气压管路系统设计[J]. 液压气动与密封, 2014, 34(10): 34-36.
- [42] 王云, 王晨宇, 刘长明. 飞机乘员个体生命保障系统的方案选择[J]. 中国个体防护装备, 2016(1): 45-48.
- [43] 杨国甫, 林贵平, 吴宝民, 等. 一种改善飞行员抗荷服性能的新方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(1): 1-3, 17.
- [44] 肖华军. 航空供氧装备与防护生理学的发展历程[J]. 解放军医学杂志, 2004, 29(10): 833-835.
- [45] 刘春杰. 高 G 载荷下飞行员紧急弹射时颈部动力学响应与损伤研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津理工大学, 2022.
- [46] 常巍, 彭智勇, 李川涛, 等. 高过载失能生理预警指标和告警技术研究进展[J]. 海军军医大学学报, 2022, 43(2): 194-200.
- [47] 包晓宁, 赵培林, 张保中, 等. 先进战斗机生命保障系统[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 246-258.
- [48] 王昌机. 高超声速飞行器循环相变热防护系统的传热机理与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- [49] 王少萍. 大型飞机机载系统预测与健康管理关键技术[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1459-1472.
- [50] 李文娟, 马存宝, 贺尔铭. 综合飞行器健康管理系统的组成框架及关键技术研究[J]. 航空工程进展, 2011, 2(3): 330-334.
- [51] 许星鑫, 甘俊杰. 浅谈飞机乘员个体生命保障系统的方案选择[J]. 现代制造技术与装备, 2018(11): 161, 163.
- [52] Borst, C., Grootendorst, F.H., Brouwer, D.I.K., Bedoya, C., Mulder, M. and van Paassen, M.M. (2014) Design and Evaluation of a Safety Augmentation System for Aircraft. *Journal of Aircraft*, **51**, 12-22. <https://doi.org/10.2514/1.c031500>
- [53] Fang, D., Li, W., Cheng, T., Qu, Z., Chen, Y., Wang, R., et al. (2021) Review on Mechanics of Ultra-High-Temperature Materials. *Acta Mechanica Sinica*, **37**, 1347-1370. <https://doi.org/10.1007/s10409-021-01146-3>
- [54] 毛富洲, 银锐明, 李鹏飞, 等. 天线罩用高温透波陶瓷材料的研究进展[J]. 硬质合金, 2022, 39(2): 149-155.

- [55] 张鹏, 朱强, 秦鹤勇, 等. 航空发动机用耐高温材料的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(11): 27-31, 37.
- [56] Fang, J., Zhang, T., Cen, Z. and Tsoutsanis, E. (2024) Multi-Electric Aero Engine Control and Hardware-In-The-Loop Verification with Starter Generator Coordination. *Aerospace*, **11**, Article 271. <https://doi.org/10.3390/aerospace11040271>
- [57] 黄红岩, 苏力军, 雷朝帅, 等. 可重复使用热防护材料应用与研究进展[J]. 航空学报, 2020, 41(12): 6-40.
- [58] Soualhi, A., Lamraoui, M., Elyousfi, B. and Razik, H. (2022) PHM SURVEY: Implementation of Prognostic Methods for Monitoring Industrial Systems. *Energies*, **15**, Article 6909. <https://doi.org/10.3390/en15196909>
- [59] Zhai, J., Li, Z., Chen, B. and Gao, B. (2023). Prognostics and Health Management (PHM) System Based on a Large-Scale Civil Aircraft Engine System. 2023 *IEEE 8th International Conference on Smart Cloud (SmartCloud)*, Tokyo, 16-18 September 2023, 57-62. <https://doi.org/10.1109/smartcloud58862.2023.00018>
- [60] Fu, S. and Avdelidis, N.P. (2024) Health Management of Aircraft Fuel Systems: A Practical Prognostic Perspective. *Proceedings of the 11th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024)*, Potsdam, 10-13 June 2024, 29-33. <https://doi.org/10.58286/29733>
- [61] Jia, W., Haimin, L. and Xiao, W. (2019). Application and Design of PHM in Aircraft's Integrated Modular Mission System. 2019 *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Qingdao)*, Qingdao, 25-27 October 2019, 1-6. <https://doi.org/10.1109/phm-qingdao46334.2019.8942896>
- [62] Yan, H., Zuo, H., Tang, J., Wang, R. and Ma, X. (2020). Predictive Maintenance Framework of the Aircraft System Based on PHM Information. 2020 *Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM)*, Vancouver, 20-23 August 2020, 1-6. <https://doi.org/10.1109/aparm49247.2020.9209454>
- [63] Rodrigues, L.R., Gomes, J.P.P., Ferri, F.A.S., Medeiros, I.P., Galvao, R.K.H. and Nascimento Junior, C.L. (2015) Use of PHM Information and System Architecture for Optimized Aircraft Maintenance Planning. *IEEE Systems Journal*, **9**, 1197-1207. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2014.2343752>
- [64] Ofsthun, S. (2002) Integrated Vehicle Health Management for Aerospace Platforms. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, **5**, 21-24. <https://doi.org/10.1109/mim.2002.1028368>
- [65] Fox, J.J. and Glass, B.J. (2000) Impact of Integrated Vehicle Health Management (IVHM) Technologies on Ground Operations for Reusable Launch Vehicles (RLVs) and Spacecraft. 2000 *IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No.00TH8484)*, Big Sky, 25 March 2000, 179-186.
- [66] Sudolsky, M.D. (2007). IVHM Solutions Using Commercially-Available Aircraft Condition Monitoring Systems. 2007 *IEEE Aerospace Conference*, [Location], [Date], [Page]. <https://doi.org/10.1109/aero.2007.352922>
- [67] Zhang, G., Wang, J., Lv, Z., Yang, Y., Su, H., Yao, Q., et al. (2015). A Integrated Vehicle Health Management Framework for Aircraft—A Preliminary Report. 2015 *IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, Austin, 22-25 June 2015, 1-8. <https://doi.org/10.1109/icphm.2015.7245034>
- [68] 朱孝赉, 成器, 宋静晖. 与载人空间站的生命保障系统相结合的新型推进系统的探讨[J]. 航天控制, 1988(2): 10-13.
- [69] 周航, 李运泽, 王胜男, 等. 基于冷热电一体化的舱外航天服生命保障系统性能[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 541-548.