

# 高空飞行密闭服的结构和关键技术分析

周毕云<sup>1</sup>, 丁立<sup>1\*</sup>, 张静<sup>1</sup>, 李潭秋<sup>2</sup>, 席林斌<sup>2</sup>

1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 生物医学工程高精尖创新中心, 北京 100191
2. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094

**摘要** 在亚轨道飞行任务中, 存在低压、高温、辐射、缺氧等复杂的飞行环境。高空飞行密闭服是实现压力防护、温度防护、工效和生命保障的重要载体, 是飞行员高空防护的核心部分。回顾了高空飞行密闭服早期技术验证, 论述了高空飞行密闭服的发展演变特征, 总结了密闭服的结构实现形式, 分析了高空飞行密闭服在设计过程中的低压防护、热防护、操作工效关键技术问题。展望了密闭服的发展, 认为未来应进一步在生产工艺、先进材料、新型服装结构等方面进行研究, 设计出标准化、轻量化、操作灵活、舒适的高空飞行密闭服。

**关键词** 密闭服; 密闭头盔; 亚轨道飞行; 飞行员

在军事领域, 随着人类军事活动范围向太空日益延伸, 空天一体化作战样式必将在未来战争中占据主导地位, 亚轨道是太空和航空的重要补充, 其战略地位十分重要<sup>[1]</sup>。亚轨道一般是指距地面 20~100 km 的空域, 处于现有飞机的最高飞行高度和卫星的最低轨道高度之间, 也称为“临近空间”<sup>[2]</sup>。进入 21 世纪后, 美军全面系统地开展了大量高超声速飞行器发展计划, 经过多次飞行演示验证阶段, 美军高超声速武器现已进入型号研制阶段<sup>[3]</sup>。SR-71、U2 是典型的美国高空侦察机, 该战机上的

飞行员穿着的服装即为高空飞行密闭服, 而不是代偿服。此后, 美军计划研发 SR-72, 洛克希德·马丁空间系统公司 (Lockheed Martin Space Systems Company) 于 2017 年完成了关键地面演示试验。此外, 该公司于 2018 年研制了一架巡航速度达 Ma 6 的有人驾驶飞行验证机 (FRV), 于 2023 年实现首飞<sup>[4]</sup>。俄罗斯等国在无人机方面取得了很大进展<sup>[5]</sup>, 但是目前无人机空中对抗能力不足, 常面临被干扰和打击的危险<sup>[6]</sup>。未来战争中, 无人和有人协同作战是必不可少的<sup>[7-8]</sup>, 特别是有人驾驶亚轨道

收稿日期: 2022-05-11; 修回日期: 2022-07-26

基金项目: 军委科技委后勤部科研项目 (BZZ18J004)

作者简介: 周毕云, 博士研究生, 研究方向为航空航天医学及人因工程、飞行员个体防护装备, 电子信箱: biyunzhou1002@163.com; 丁立 (通信作者), 教授, 研究方向为航天服热控、飞行员个体防护装备等, 电子信箱: 07441@buaa.edu.cn

引用格式: 周毕云, 丁立, 张静, 等. 高空飞行密闭服的结构和关键技术分析[J]. 科技导报, 2023, 41(21): 6-13; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.21.001

飞行。因此,实现亚轨道飞行必须要提供安全可靠的飞行员个体防护装备。

第二次世界大战之后直到现在,世界各国空军仍然是使用最广泛的抗荷服,主要研究方向依然围绕五囊式抗荷服、代偿背心<sup>[9]</sup>。但亚轨道飞行器飞行区域主要包括平流层大部分、中间层和一部分增温层区域,该环境空气稀薄,存在低压、缺氧、辐射等特殊环境<sup>[10]</sup>。根据阿姆斯特朗极限可知,在没有压力的衣服保护下,位于驾驶舱的机组人员会因为失去气密性导致人体内水分蒸发,损害肌肉组织和堵塞血液运行<sup>[11]</sup>。故研制高空飞行密闭服以保障飞行员的生命安全是科学家们面临的重大挑战。美国明确指出亚轨道飞行器目前还没有能对抗该武器的防御系统<sup>[12]</sup>。中国亚轨道飞行器也在不断发展。2020年9月,我国曾发射一款可重复使用的试验航天器,该项目被认为对标美国的X-37B空天飞机<sup>[13]</sup>。2021年7月17日,中国成功试验了“亚轨道重复使用演示验证项目运载器”<sup>[14]</sup>。该飞行器是航天航空技术的高度融合体。而中国开展关于亚轨道飞行器飞行员的个体防护装备研究很少。因此,本文介绍高空飞行密闭服的基本结构及其发展历程,并阐述设计过程中面临的一些关键技术的发展现状。

## 1 高空飞行密闭服功能结构

高空飞行环境复杂,飞行员面临着很多生命危险。海拔越高,人体处理氧气的能力就越低,高空环境压力低,容易发生减压病、体液沸腾等危险<sup>[15-16]</sup>。亚轨道飞行器飞行环境特殊,目前的抗荷服不能保障亚轨道飞行器机组人员的生命安全。如果在亚轨道上飞行器座舱失去气密性后暴露在高空,将会给人带来严重的缺氧、减压病、冷损伤等危害<sup>[17]</sup>,高空飞行密闭服需能够保障飞行员继续操作飞行器完成飞行任务并安全降落。此外,当飞行员应急弹射离开飞行器时,将会面临低压、高速气流吹袭、高温和低温环境等危险,高空飞行密闭服需保证飞行员安全着陆。另外,需要保障飞行员在穿着密闭服时能够灵活操作飞行器进行滑行、起

飞、爬升、巡航到下降、着陆等活动。

高空飞行密闭服的功能结构复杂,按照其结构划分主要包括衣体、密闭头盔、手套、通风服等部分<sup>[18-19]</sup>。其中,衣体分为3层:内层为舒适衬里层,中间层是气密层,外层是限制层<sup>[20]</sup>,以保证高空飞行密闭服密封性、阻燃性等性能良好。高空飞行密闭服的关节处需设计特殊活动关节,以保证密闭服内产生余压时人体活动工效,其主要位于肩、肘、腕、指、膝、髌关节处。以美国的S1034E型头盔为例,密闭头盔主要由壳体、硬质层、舒适层、面窗、通信系统、供氧系统等结构组成(图1)<sup>[21]</sup>。

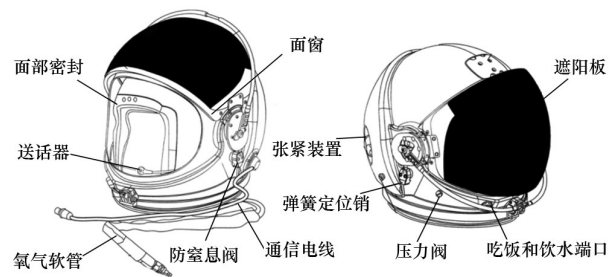


图1 S1034E型头盔

手套对于飞行员的操作活动性能和整体生存同样至关重要。其主要由气密层、限制层、调节绳等组成(图2)<sup>[22]</sup>。气密层是一种结实的橡胶,其通过布带、胶水与断接器连接。手套的背部有2根调节绳,用以保持手套充压后的形状,避免充压后膨胀。手指的顶部都有一个小凸起,与限制层内侧的

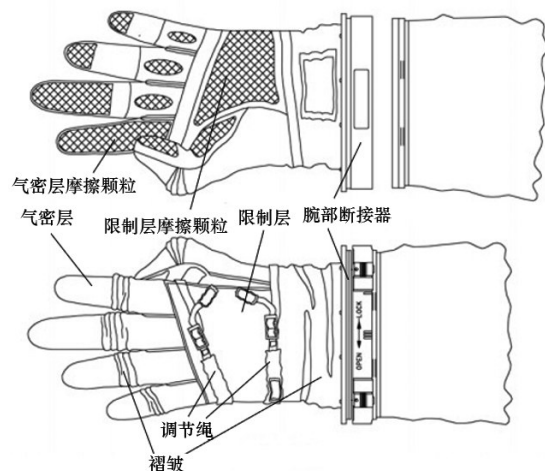


图2 S1035手套

其他接口缝合,以便飞行员穿脱手套。为防止人体热应激,通风服与密闭服配套使用,通风管道分布在躯干及四肢。

## 2 高空飞行密闭服技术发展

20世纪30年代,苏联研制成功试验性密闭服<sup>[23]</sup>,但是其中绝大多数从未进入飞行,只是科学项目,其主要用于防止缺氧,而不是减压病,但这些早期的实验为后来的工作提供了依据,从而发明了实用的密闭服<sup>[24]</sup>。1936年,美国飞行员 Wiley Post 创造了使用密闭服飞行的记录<sup>[15]</sup>,1947年初,美国海军开始了密闭服的研发工作,研制了 Model 型号的密闭服,但是其开发的大多数服装都相当紧身。截至1951年,Model型密闭服经历7代的发展<sup>[15]</sup>,并在高达27 km的高空舱中进行了测试(图3<sup>[15]</sup>),该服装胸部、腹部、头盔和手臂长度均可调节,采用了拉链密封以便穿脱,但是服装仍然需要提高舒适性和关节活动性,特别是肩关节的活动非常困难,肩部的轴承在压力下稍微向外移动,导致腋窝不适,膝盖和肘部弯曲良好,但颈部活动较差<sup>[25]</sup>。



图3 Model 7型密闭服

在 Model 型号的研制基础上开发了 Mark 型号密闭服,截至1967年,开发的5代 Mark V 密闭服可用于平流层飞行<sup>[26]</sup>。与 Model 系列比较,该类型防护服在重量控制上已经得到了很大改善。Mark V 总重量约9 kg,头盔方面极具创新性,头盔内的面密封将头盔分为2个部分,且可以通过调整内衬大小以保证面部密封性能,前部分用氧气加压,而后部分对密闭服的其他部分开放,氧气通过安装在遮阳板周围的管道穿孔流动,以减少遮阳板的雾化,

氧气以高于密闭服内部1.8 mmHg的压力输送到头盔前方部分,排出的气体通过单向阀进入密闭服内部。头盔面窗的密封采用气动密封,面窗设计防止眩光。

20世纪50年代初,美国军用航空技术飞速发展。1954年,美国空军评估发现美国海军生产的密闭服不能满足B-52战机的服役日期,于1955年美国空军独立进行密闭服的开发工作,其中MC-2可应用于最初的X-15高超音速飞机<sup>[27-28]</sup>,后来在MC系列的基础上研制了S901系列密闭服以满足U-2、SR-71、A12等型号战机。SR-71的首批试飞员穿着S901系列,在之后的试飞中不断改进,研制了S1030密闭服,正式列装SR-71的飞行员,并在此后广泛装备U-2飞行员。1988年2月,经过S1030多代的更新改进,对模块化的防窒息阀、低扭矩轴承、通信系统等进行了改进,David Clark生产了第一套S1032,该防护服可以保障飞行员在30 km的高空飞行,且可以保障10 min应急供氧,可以为浸泡在4℃水中的受试者提供超过3 h的保护,并在密闭服的左侧大腿上增加了生物医学仪器端口。

1990年,David Clark公司完成了S1034密闭服的开发和测试,受试者穿着密闭服在-50℃的情况测试3 h,发现受极端寒冷的影响,需要在手部和足部设计加热装置,采用平褶式关节结构设计减少了指关节在加压和非加压下的关节力矩。基于S1032和S1034的技术,该公司设计了S1035密闭服(图4<sup>[29]</sup>),其头盔结构和压力制度与S1032一致,且更轻、体积更小、热舒适性更好,在发射时可以配套抗荷服使用<sup>[18,29]</sup>。但是由于机组逃生模式和任务目标的不同,附件的集成存在差异,S1035没有使



图4 S1035型密闭服

用内部舒适衬垫、排气系统和尿液收集系统,配套抗荷服使用时存在一定的热应激,导致极度地不舒适。主要是由于飞行员穿着密闭服做简单工作需要的代谢是未着服的2~4倍,且其中的75%进一步增加了人体热负荷。Raven等<sup>[30]</sup>分析了通风服的散热性能,穿着循环通风的密闭服可以降低人体的热应激,但在中度工作水平以上,密闭服通风散热会出现更大程度的热暴露。截至2011年,美国最后一次航天飞机任务STS-135结束后,S1035面临退役<sup>[31]</sup>。但美国在新一代太空发射系统(SLS)和猎户座(Orion)载人飞船任务中对其进行改进使用<sup>[32]</sup>。

最近几年,美国政府加快了深空探索的步伐,在S1035的基础上,David Clark公司和NASA共同设计和开发了这款S1041OCSS新型密闭服(图5<sup>[33]</sup>),其配备了液冷服和通风服,具有4.3和8 psi (1 psi=6894.757 Pa)这2种工作压力制度。2017年,18名受试者穿着该密闭服进行真空舱测试并取得成功,验证了该服装在真空环境中的能力<sup>[33-34]</sup>。综上所述,目前美国在高空飞行密闭服方面已经有了很丰富的经验。



图5 S1041 密闭服

中国航空事业的发展相对于美国起步较晚。1989年,中国第一代高空飞行密闭头盔研制成功<sup>[35]</sup>,该头盔与高空代偿服配套使用(图6<sup>[35]</sup>)。在参考俄罗斯TII-6系列头盔基础上,中国又研制了TK-4型飞行员密闭头盔。TK-4开放式密闭头盔与高空代偿服(DC-3/DC-4)配套使用,可以保证飞行员在飞行高度25 km以下的密闭座舱内长时间飞行,以及座舱失去气密性的短时间(10 min)飞

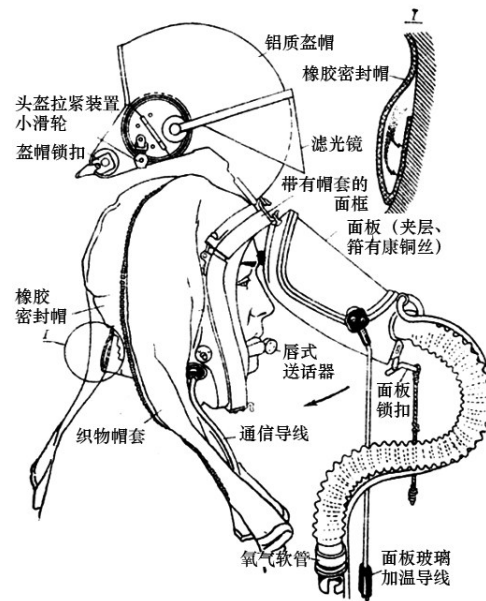


图6 TK-1头盔结构示意图

行。但是对于高空侦察机和航天飞机上用的高空飞行密闭服的研究,中国几乎是空白的。

中国的飞行员防护装备相比于国外先进水平相差了一代或者更多,并且现有防护服不能够保障飞行员在亚轨道上安全飞行,应该吸收借鉴国外先进技术,立足自主研发具备中国特色的新型飞行员个体防护装备。

### 3 现阶段密闭服发展关键技术

#### 3.1 低压防护技术

数百万人生活在海拔较高的地方,其气压是海平面气压的2/3或更低。如果减压足够慢,人们可以在低至海平面压力近1/5的纯氧环境中工作而不会造成伤害。由于较高压力的密闭服通常会导致人体工作量增加和疲劳,因此密闭服的设计目标是在可能的最低压力下运行。使用低压密闭需要减压,这又增加了更多的危险。因为当人体由高气压环境快速转向低气压环境时,压力迅速下降,人体内的氮脱离脂肪、软骨等组织,导致人体呼吸困难、关节疼痛,产生减压病。故合理地设计密闭服的壓力制度极其重要,对密闭服充压才能保证飞行员在飞机正常飞行和失事状态下不发生减压病,故高空飞行密闭服应该具备合理的压力制度。

从生理学角度出发,高空飞行密闭服保持的高度不应该超过 8000 m(268 mmHg),大于该高度发生减压病的概率会增大;从操作工效的角度出发,高空飞行密闭服较高的压力制度,会严重影响密闭服的关节活动性<sup>[36]</sup>。此外,还需考虑飞行器座舱与密闭服的压力制度两者之间的合理匹配关系,所以在设计高空飞行密闭服时,需要同时考虑上述 3 种因素,以及亚轨道飞行时飞行员高空减压病易感性是否较高等问题,这是需要继续深入研究的实际问题。

美国在密闭服的研制和应用方面已经比较成熟,对密闭服的压力制度制定做了大量的验证,例如 MC-3 采用了 3.5 和 5 psi(1 psi=6.895 kPa)两档压力制度;S1032 型号服装采用了 2.8 psi 压力制度;S1034 采用的是 3.5 和 5 psi 的双档位压力制度,其中 3.5 psi 是标准工作压力,在需要时也可以调整为 5 psi<sup>[37-38]</sup>。在设计高空飞行密闭服时,可以参考上述服装压力制度并结合座舱压力制度在 2.8~5.0 psi 范围内选择。

### 3.2 热防护技术

人体对高低温的耐受限度很小,过冷或过热都会破坏人体与环境的热平衡,引起各种生理反应,在飞行器发射返回或者座舱失去气密性情况下将会面临高温、高湿等环境<sup>[17]</sup>。此外,由于环境气压、失重等环境因素的变化,导致人体的传热、散热效率及方式产生了变化<sup>[39]</sup>,必须保障人体的热平衡才能保证任务的顺利完成。

密闭服是一个微小的密闭环境,其设计应该充分保证人体的温度环境安全舒适,不会产生热应激或者冷损伤情况,此外还需排除人体产生的水汽与二氧化碳等。当前的研究和工程实践中主要采用通风服或液冷服来调节飞行员的热舒适性,且得到了很好的运用<sup>[38,40-41]</sup>。但在低压条件下,气体密度降低,对流换热速率随着海拔的升高而减小,蒸发换热增加<sup>[9]</sup>,从而导致低压下人与环境之间的传热机制和人体热调节机制改变。需综合考虑失重、大气成分、压力、温度、湿度和风速等复合环境,深入研究低压下的人体热舒适机制,为液冷服和通风服的设计提供理论支持。此外,还应该探究低压条件下通风服或液冷服的管长、管径、流率和进口流体

温度对散热量和散热效率的影响机制<sup>[42]</sup>,从而设计出符合亚轨道飞行的高空飞行密闭服。

### 3.3 操作工效技术

亚轨道飞行过程中,密闭服须具备良好的关节活动性并且能够保证飞行员正常地操作飞行器飞行<sup>[38]</sup>。密闭服的内部充气加压导致服装内外产生压差,服装膨胀变硬,使得服装关节在运动时产生了较大的关节阻力矩,关节活动度受限,制约飞行员操作飞行器的效率。服装的压力值越大,关节活动受限越严重。密闭服的设计应满足关节灵活可靠,能保障飞行员的各关节和头颈部充分操作飞行器;特别是手的灵活性、触感和舒适度等问题极其重要。此外,还应该保证完成活动所需的力不应该使飞行员感到过分疲劳。

目前研究中主要采用平褶式和波纹式关节来实现关节运动,关节活动角度和关节力矩是判断关节活动性优良的主要指标。关节力矩主要源于体积效应(关节运动期间的体积变化而使内部工作气体等压位移所需的扭矩)和结构效应(在加压状态下弯曲服装材料所需的额外扭矩),恒定体积的关节设计已经成为密闭服工程师设计的目标<sup>[43]</sup>。理论研究方面,国内外学者对不同的阻力矩模型进行了研究,Main 等<sup>[44]</sup>利用充气弹性梁、用最小势能原理等分析了充气关节的力矩特性,采用磁滞模型<sup>[45]</sup>得到能够反映出关节力矩迟滞特性的数学模型。一般情况下,设计关节的关节弯曲力矩不能超过人体相应关节肌力矩的 20%。工程师设计时需同时考虑关节力矩和关节角度,尽可能地减小关节阻力矩。

关于关节角度分析有 2 种常见的方法:一是摄影测量法,从受试者的照片中测量服装关节运动角度,但这种方法只量化单独的运动关节,很难准确地表征密闭服在复杂任务中的活动性;二是三维视频运动捕捉技术,穿着密闭服的受试者配备反光标记,当受试者执行任务时,用多个摄像头组成的系统跟踪标记其运动过程,但是所需设备昂贵和后处理时间较长。故需进一步建立简单快速的关节角度测量方法,以评估服装的关节活动角度。

服装充压和无压条件下飞行员关节的几何形态、运动形式、关节角度、关节力矩等是密闭服设计

的关键问题。需要针对飞行员操作飞行器动作特征,就关节力矩的产生和变化机理进行研究,为飞行员密闭服关节设计提供客观的依据或标准。此外,关节运动做功会产生热,可以尝试将人体产热和关节做功结合起来评估密闭服的操作工效。

## 4 结论

高空飞行密闭服是亚轨道飞行器飞行员必需穿着的高空应急防护救生装备。目前为止世界各国并没有停止关于高空飞行密闭服的研制,中国应该加快高空飞行密闭服的研制工作,短期内实现从无到有,制造出能够保障飞行员生命活动的密闭服;设计出更大活动自由度和更小关节力矩的防护服,实现整个服装的轻量化,增加服装的热舒适性。长期目标应该在生产工艺、先进材料、新型服装结构等方面进行进一步研究<sup>[46]</sup>,建立一套符合中国国情的完整的设计标准,不断降低生产成本;可以尝试将弹性材料技术与特殊的服装结构设计相结合<sup>[47]</sup>,从而推动高空飞行密闭服的发展。

### 参考文献(References)

- [1] 唐克,冯宝龙,谢保军,等.临近空间飞行器开发利用现状与发展趋势[J].飞航导弹,2012(11):44-48.
- [2] 陈鹏,宋愿赞,李文静,等.临近空间高速侦察与监视载荷技术研究综述[J].战术导弹技术,2021(1):7-12.
- [3] 王卫杰,司文涛,王伟超,等.美军高超声速武器技术发展及影响[J].中国航天,2020(4):54-59.
- [4] 孟令扬.SR-72无人机的研制进展[J].航空发动机,2013,39(6):12.
- [5] 王鹏飞,王光明,蒋坤,等.临近空间高超声速飞行器发展及关键技术研究[J].飞航导弹,2019(8):22-28.
- [6] 牛轶峰,沈林成,李杰,等.无人-有人机协同控制关键问题[J].中国科学:信息科学,2019,49(5):538-554.
- [7] 陈杰,辛斌.有人/无人系统自主协同的关键科学问题[J].中国科学:信息科学,2018,48(9):1270-1274.
- [8] Otto R P. Small unmanned aircraft systems (SUAS) flight plan: 2016-2036. Bridging the gap between tactical and strategic[R]. Washington: Federal Aviation Administration, 2016.
- [9] Kandjov I M. Heat and mass exchange processes between the surface of the human body and ambient air at various altitudes[J]. International Journal of Biometeorology, 1999, 43(1): 38-44.
- [10] Widiawan A K, Tafazolli R. High altitude platform station (HAPS): A review of new infrastructure development for future wireless communications[J]. Wireless Personal Communications, 2007, 42(3): 387-404.
- [11] 高明泉.飞行与体液沸腾[J].航空知识,1997(11):24.
- [12] 刘畅,许相玺.临近空间飞行器——改变未来战场规则的新型武器[J].军事文摘,2020(17):46-49.
- [13] 王宇虹.中国成功发射可重复使用试验航天器[J].导弹与航天运载技术,2020(5):98.
- [14] 瑾媛.过于先进的可重复使用运载器[J].航空知识,2021(9):1.
- [15] Mohler S R. Wiley Post, his Winnie Mae, and the world's first pressure suit[J]. Smithsonian Annals of Flight, 1971, 8(1): 1-127.
- [16] Boyne W J. Beyond the horizons the lockheed story[M]. New York:Thomas Dunne Books, 1998.
- [17] Chang C M, Sauser B W, Bue G C, et al. Space shuttle launch entry suit thermal performance evaluation[J]. SAE Transactions, 1993, 102: 1646-1659.
- [18] Watson R D. Modified advanced crew escape suit intra-vehicular activity suit for extravehicular activity mobility evaluations[C]//Proceedings of the 44th International Conference on Environmental Systems. New Mexico: David Clark Company, Incorporated, 2014.
- [19] Patlach R, Stepaniak P C, Lane H W. Loss of Signal: Aeromedical lessons learned from the STS-107 Columbia space shuttle mishap[C]//Proceedings of the Aerospace Medical Association Meeting. Washington: NASA Technical Reports Server (NTRS) Collection, 2014.
- [20] 刘长明.神奇的“微小加压舱”[J].航空知识,2008(8):26-27.
- [21] Jenkins D R. Dressing for altitude: U.S. aviation pressure suits—Wiley post to space shuttle[M]. Washington, DC: the National Aeronautics and Space Administration, 2012.
- [22] Schafer L E, Rajulu S L, Klute G K. A comparison of two shuttle launch and entry suits: Reach envelope, isokinetic strength, and treadmill tests[R]. Washington: NASA Technical Reports Server, 1992.
- [23] 姚娟,刘长明.高空飞行密闭服装——飞行员和宇航员个体防护装备系列介绍[J].中国个体防护装备,2010(5):52-55.
- [24] Boyle R. New experiments physico-mechanical, touch-

- ing the spring of the air, and its effects (Made, for the most part, in a new pneumatical engine) [M]. Oxford: Miles Flesher, 1973.
- [25] Gell C F, Hays E L, Correale J V. Developmental history of the aviator's full pressure suit in the U.S. Navy[J]. *Journal of Aviation Medicine*, 1959, 30(4): 241.
- [26] Coburn K R, Kellett G L, Turaidis T. Full pressure suits and personal hygiene[R]. Washington: NASA Technical Reports Server, 1967.
- [27] 魏毅寅, 张冬青, 叶蕾, 等. 美国 X-51A 飞行器完成首次动力飞行试验[J]. *飞航导弹*, 2010(6): 2-7.
- [28] Jenkins D R, Landis T. Lockheed Sr-71/Yf-12 blackbirds[M]. New York: Voyageur Press, 1997.
- [29] Lambert M S. Advanced crew escape suit[J]. *Aerospace Engineering*, 1995, 15(9): 11.
- [30] Raven P B, Dodson A, Davis T O. Stresses involved in wearing PVC supplied-air suits: A review[J]. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 2010, 40(7): 592-599.
- [31] 肖志军, 管春磊, 李潭秋. 俄美航天服回顾与展望[J]. *航天医学与医学工程*, 2011, 24(6): 460-466.
- [32] 张万欣, 李潭秋, 尚坤, 等. 航天服压力防护技术发展构想[J]. *航天医学与医学工程*, 2018, 31(2): 121-130.
- [33] Jacobs S, Tufts D, Gohmert D. Space suit development for orion[C]//48th International Conference on Environmental Systems. New Mexico: David Clark Company, Incorporated, 2018.
- [34] Jacobs S, Tufts D, Green D, et al. Development of a custom space suit for orion[C]//49th International Conference on Environmental Systems. New Mexico: David Clark Company, Incorporated, 2019.
- [35] 吴之明, 黄绍华. 蓝天骄子的“保护神”——我国第一代飞行员高空密闭头盔开发纪实[J]. *航空史研究*, 2000(2): 26-28.
- [36] Kobrick R L, Carr C E, Meyen F, et al. Using inertial measurement units for measuring spacesuit mobility and work envelope capability for intravehicular and extravehicular activities[C]//Proceedings of the International Astronautical Congress. Paris: International Astronautical Federation, 2012.
- [37] Macleod S, Ripps T, Garcia J, et al. The demonstrator suit: Evaluating a full pressure suit through manned and unmanned testing[C]//Proceedings of the 41st International Conference on Environmental Systems. New Mexico: David Clark Company, Incorporated, 2011.
- [38] Tufts D, Jacobs S, Barry D. The demonstrator suit: Incorporating waist, hip and shoulder mobility in a full pressure suit[C]//Proceedings of the 40th International Conference on Environmental Systems. New Mexico: David Clark Company, Incorporated, 2010.
- [39] Wang H Y, Hu S T, Liu G D, et al. Experimental study of human thermal sensation under hypobaric conditions in winter clothes[J]. *Energy Build*, 2010, 42(11): 2044-2048.
- [40] Nyberg K L, Diller K R, Wissler E H. Model of human/liquid cooling garment interaction for space suit automatic thermal control[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2001, 123(1): 114-120.
- [41] Sullivan P J E, Mekjavic I B, Kakitsuba N. Ventilation index of helicopter pilot suits[J]. *Ergonomics*, 1987, 30: 1053-1061.
- [42] Xu G. Removal of CO<sub>2</sub>, moisture and heat from ventilated suit under different pressures[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 1996, 9(4): 251-255.
- [43] Kobrick R L, Carr C E, Meyen F, et al. Using inertial measurement units for measuring spacesuit mobility and work envelope capability for intra vehicular and extravehicular activities[C]//Proceedings of the International Astronautical Congress. Paris: International Astronautical Federation, 2012.
- [44] Main J A, Peterson S W, Strauss A M. Design and structural analysis of highly mobile space suits and gloves[J]. *Journal of Spacecraft Rockets*, 1994, 31(6): 1115-1122.
- [45] Atherton D C J L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. *Journal of Magnetism Magnetic Materials*, 1986, 62(1/2): 48-60.
- [46] Huerta R, Kerr E S, Anderson A P. Mechanical counter-pressure and gas-pressurized fusion spacesuit concept to enable martian planetary exploration[C]//Proceedings of the International Conference on Environmental Systems. New Mexico: David Clark Company, Incorporated, 2018.
- [47] Holschuh B, Obropta E, Buechley L, et al. Materials and textile architecture analyses for mechanical counter-pressure space suits using active materials[C]//Proceedings of the AIAA Space 2012 Conference & Exposition. Reston VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Sep, 2012.

## Analysis of the structure and key technology of high-altitude full pressure suit

ZHOU Biyun<sup>1</sup>, DING Li<sup>1\*</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, LI Tanqiu<sup>2</sup>, XI Linbin<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Biomechanics and Mechanobiology (Beihang University), Ministry of Education Beijing Advanced Innovation Center for Biomedical Engineering School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China
2. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China

**Abstract** This paper retrospects the high-altitude full pressure suit in early technical validation, describes the development and evolution characteristics of the high-altitude flight full pressure suit, and summarizes the structure realization forms. Besides, the critical technical problems, i.e., low-pressure protection, thermal protection and operational ergonomics in the design process of the high-altitude full-pressure suit, are analyzed. Finally, the development of full pressure suit is prospected. It is considered that the manufacturing technique, advanced materials and new suits structure should be further studied in the future, and a standardized, lightweight, flexible and comfortable high-altitude full pressure suit should be designed.

**Keywords** full pressure suit; air-locked helmet; suborbital flight; pilot ●



(责任编辑 王志敏)