

国外载人航天出舱活动故障综述

王岩松 石培新 张 峰

(中国国防科技信息研究中心)

摘 要 从空间环境、人为因素、航天服和气闸舱等方面综述历年来国外载人航天出舱活动的主要故障,供研究和参考。

关键词 载人航天 出舱活动 航天服 气闸舱

1 前言

出舱活动是指航天员在运行轨道上或天体表面上到航天器舱外的环境中所进行的活动。它包括在轨道或天体表面上维修、装卸、更换和回收各种航天器及空间设施,更换有效载荷,组装大型空间结构(如空间站)和部署空间武器等。

随着空间实验室、空间站及航天飞机的发展,人类也更多地有目的进行出舱活动或空间作业,如修复大型“哈勃”空间望远镜,为国际空间站安装试验设备等。航天员出舱活动是一个复杂过程,由于空间的特殊环境,要保障航天员安全、顺利和高效率地完成整个出舱任务,还涉及到许许多多的问题。从 1965 年 3 月 18 日苏联航天员列昂诺夫完成首次出舱活动到 2008 年 4 月国际空间站第 17 长期考察组进行的两次出舱活动,共有 400 多名航天员完成了出舱任务,这其中发生过许多出舱事故,所幸未造成人员伤亡。因此,出舱活动直接关系到航天员的生命安全和任务的顺利完成,对出舱事故的研究尤为重要。

2 空间环境对出舱活动的影响

出舱活动是一项风险很大的航天活动,因为空间环境非常恶劣:阳光下温度高达 120℃,背阴处温度低于零下 100℃,还有大量的宇宙辐射,这些都将对航天员的健康构成威胁。在失重的环境下,航天员的心理和生理都要发生变化,如果航天员工作负荷太大或任务过于复杂,使航天员过度劳累,则可能危害航天员的健康和载人航天器的安全。

在空间环境条件下,航天员的生理和心理都会发生相应的变化,所以工程技术人员首先要从人的心理、生理状态和外在管理出发,建立人的生物节律监控系统,以维持航天员的健康状态和工作能力。其次在出舱活动中必须精心地选择空间环境条件最安全的时期,因此对空间环境的预报也尤为重要。此外,航天员与微流星体、空间垃圾的碰撞也是航天员出舱故障的隐患之一。

1969 年 3 月,“阿波罗 9”号飞船上的航天员吕塞尔·施维卡特患上严重的空间运动病。在飞行的第 2 天,早餐后突然出现连续呕吐。地面控制中心的医监和医保专家考虑到出舱活动的安全,考虑到若航天员在穿着舱外航天服和戴着头盔时再呕吐,将危及航天员的生命安全。因此,原计划 2h 的出舱活动不仅被推迟,而且时间也大大缩短。

1971 年 2 月,“阿波罗 14”号飞船的航天员阿兰·谢泼德在月球表面上攀登环形山时,心跳升至 150 次/min,从安全的角度考虑,提前结束了出舱活动。从“阿波罗 14”号飞船开始,月球出舱活动中航天员使用了备份系统。

2007 年 2 月 3 日,国际空间站两位美国航天员洛佩斯·阿莱格里亚和苏尼塔进行第二次出舱活动,少量有毒氨气从一条液体管线中泄漏,氨气在遇真空后凝结成薄片,幸运的是,洛佩斯·阿莱格里亚和苏尼塔成功避开有毒氨气。在 1 月 31 日洛佩斯·阿莱格里亚和苏尼塔进行的首次出舱活动时,也发生过少量氨气泄漏的事故。一旦有足够的氨气进入国际空间站,有可能会对站内三位航天员的呼吸造成

困难。

3 人为因素对出舱活动的影响

由于航天员自身生理和心理上的障碍,可能出现对系统监视和操作上的误判断。实践证明,加强航天员的心理和智能选拔、有效地进行模拟操作训练以及体质锻炼等能够显著地减少航天员的人为失误。

1978 年 12 月 20 日,礼炮号空间站的航天员罗曼年科准备出舱活动,戈列奇科在气闸舱内监控着罗曼年科的活动。罗曼年科将头伸出舱门外,身体即将离开空间站的时候,戈列奇科手疾眼快,一把拽住了他,因为罗曼年科忘了系安全绳索。如果没有戈列奇科,罗曼年科将有可能成为“人体卫星”。

1985 年 4 月,航天飞机 STS-51D 上的一名航天员,在出舱活动中出现人为失误,他不小心走过航天飞机的机翼,差一点儿不能返回座舱。

2004 年 8 月 3 日,国际空间站两名航天员进行出舱活动时与地面之间的通信联络一度中断 20min,令地面控制专家虚惊一场。美国航空航天局专家 4 日在俄地面飞行控制中心透露说,通信联络中断是美国地面控制专家错误操作所致。

2006 年 7 月,“发现”号航天员在出舱活动时丢失了一把 35.56cm 长的抹刀。这种失误可能对今后的航天器和航天员的出舱活动造成威胁。

2006 年 9 月 9 日至 9 月 21 日“亚特兰蒂斯”号航天飞机 STS-115 任务。在此次飞行任务的出舱活动中,前两次出舱活动均发生了螺栓丢失现象。

2006 年 9 月 12 日,“亚特兰蒂斯”号航天员进行第一次出舱活动时出现操作失误,一根带子以及弹簧和清洗机失去控制,这一事故可能对空间站的桁架的配线和管道造成损害。在与空间站对接时发生过一次小事故:航天员罗伯特·克比姆前往航天飞机外工作时发生意外,他在连接试验舱与空间站冷却剂管时,大约两磅重的氨冷却剂泄漏,幸好航天服保护了他,这一泄漏很快被堵上。

4 舱外航天服设计对出舱活动的影响

舱外航天服又称舱外活动服,由压力服、热和流星防护服、通风-液冷服、出舱面窗组件和通信头戴等组成。

舱外航天服是航天员完成出舱活动的必要装备,其基本功能为保障恶劣环境下人的正常生存和工作条件,即保障航天服内部的生存环境,使航天员免受空间辐射、真空、高低温等因素的影响并便于操作。出舱航天服的关键技术之一是保证航天员的操作灵活性,首先是手的灵活,其次是四肢和腰关节的活动灵活。近年来,航天服工效设计的不完备给航天员带来不小的麻烦。

1966 年 6 月,“双子座 9”号飞船上的尤金·赛尔南在出舱活动时,面罩内出现雾,限制了他的视线,以致不能用航天员机动装置飞行。指令长决定中止这次出舱活动。更不幸的是,由于出舱活动中身体过度用力,赛尔南的航天服背部外层被划破,受太阳光照射,他的背部被晒伤。太阳光的热还损坏了服装的生命保障系统。在出舱活动结束后返回飞船座舱时,他在斯塔福德帮助下才得以进入座舱。

1966 年 7 月,在“双子座 10”号飞船出舱活动期间,麦克·考林斯和约翰·扬感到有东西刺激他们的眼睛,同时还从他们的航天服内闻到一股异味。这是由于航天服的两个风机同时打开,氢氧化锂泄漏进他们头盔内,刺激他们的眼睛所致。在第 2 次出舱活动中,他们将航天服内的风机关掉一个,这样可以防止氢氧化锂泄漏。

1966 年 9 月,在“双子座 11”号载人飞船上,航天员理查德·高登在执行出舱任务的过程中,由于服装的冷却系统和热交换器未能正常工作,他工作 6min 后,大汗淋漓,汗流进他的眼睛,使之不能正常视物。当他摸索着走向舱门,期间还需要指令长康拉德的引导。

1982 年 11 月,在航天飞机 STS-5 飞行中,一名航天员由于出舱活动航天服出现故障,出舱活动被取消。

1984 年 STS-41C 上的航天员乔治·D·纳尔逊遇到了“小的尿污染问题”。换句话说,他在出舱活动时撒尿了。当时他穿着的液冷服成了海绵,吸收了大部分的尿液,头盔中又出现了雾。飞行后的检查显示,雾气的出现是因为航天员觉得太冷,降低了液冷服中冷却水的流速。冷却水流速减小可降低通风速度,所以使水汽凝结在面罩内。

1991 年 7 月 21 日,航天员安那托利·阿尔采巴斯科在出舱活动中,由于航天服热交换器故障而导

致头盔面罩起雾。另一个航天员谢尔盖·科里克列夫不得不引导他返回“和平”号气闸舱,提前结束出舱活动。

1992 年 2 月 20 日,航天员沃尔科夫在出舱活动刚开始时,由于航天服在“和平”号空间站上存放的时间过长,航天服的热交换器堵塞。因此,他只能将服装连接在航天器的冷却系统上,在气闸舱的舱门附近活动。

1993 年 9 月 28 日,航天员齐布里耶夫的航天服冷却系统出现故障,他也只能在“和平”号气闸舱舱门附近,为另一名出舱活动的航天员做些支持性的工作。在第 2 次出舱活动中,谢列布罗夫航天服的氧循环系统出现问题,这套航天服已经由不同的航天员在 13 个不同的场合使用过,大大超过了设计寿命。

1995 年 7 月 19 日,航天员索沃维耶夫航天服的冷却系统出现故障,面罩起雾,严重地影响了他的视线。幸运的是航天员离主舱门很近,可以接入空间站中的冷却系统。

2004 年 2 月 27 日,国际空间站第 8 长期考察团两名成员俄罗斯航天员亚历山大·卡列里和美国航天员迈克尔·福阿莱首次在无人留守国际空间站的状态下进行出舱活动时,卡列里的航天服无法制冷,头盔内出现水汽,航天服内温度升高,致使他们不得不提前结束出舱活动。地面控制技术人员分析问题可能出在卡列里航天服的温控装置上。

2007 年 8 月 9 日至 8 月 22 日“奋进”号航天飞机执行 STS-118 任务。第三次出舱活动,按计划于美国东部时间 15 日由里克·马斯特拉基奥和国际空间站航天员克莱顿·安德森进行,预定时间为 6.5h,但由于中途马斯特拉基奥的手套外层出现破损,基于安全考虑,两人被迫提前返回空间站内。

随着出舱活动任务的复杂性和出舱距离的增加,航天服及其系统的可靠性日益引起设计者和技术人员的关注。(1)使用航天手套对手的防护与保持手具有良好功能作用的发挥,两者之间存在矛盾。如何有效地保护航天员的手免受伤害,又能保持手的灵活性和触觉的敏感性,是目前设计者急待解决的问题。(2)早期的舱外服没有独立的生命保障系统,而是使用脐带。现代的航天服有自己独立的生命保障系统,用来提供氧气、通风散热、电力和

通信。目前舱外航天服使用的冷源普遍采取水升华方案,每次出舱活动都要消耗一定的水。随着出舱活动的日益频繁,出舱时间越来越长,美、俄两国纷纷开始研制新的非消耗、可再生冷源。完善的生命保障系统是提高航天员出舱活动安全性的重要指标之一。(3)解决出舱航天服的研制周期长、结构复杂、价值昂贵的问题。

5 气闸舱设计与操作对出舱活动的影响

气闸舱是载人航天器中航天员进入太空或由太空返回时使用的气密装置。气闸舱是高气压环境与低气压环境之间的一道闸门,也是出舱活动系统的一个重要接口。在航天飞机和国际空间站上,气闸舱又是航天员穿脱航天服和储存航天服的场所。出舱活动的航天员由于在时间、资源、运动和灵活性上都受到一定程度的限制,因此在气闸舱的设计上要提供方便。

1965 年 3 月 18 日,苏联航天员列昂诺夫成为世界上完成出舱活动的第一人。他准备结束出舱活动返回座舱时擅自将航天服内的压力调低 20%,当他将头伸进气闸舱时发生一个问题,气闸舱的直径是 1.0m,而列昂诺夫穿着航天服的身高是 1.9m,因此他不能在圆筒形的气闸舱中将身体转过来关闭身后的舱门。后来不得不冒着患减压病的风险,再次调低航天服内的压力。最后终于回到飞船座舱中,这时他已大汗淋漓,航天服里面全是汗水,体重减了 5.4kg。

1997 年 12 月,“礼炮”号空间站航天员罗曼年科出舱活动,当他启动控制系统关闭气闸舱的减压阀时,阀门没有关上,数据显示阀门被卡住了,两名航天员无法进入“礼”炮号空间站。地面控制中心要求他们再试一次,这次减压阀被关上了,气闸舱又重新加压,两名航天员终于进入空间站。

1990 年 7 月 17 日,两名航天员经过“量子-2”气闸舱走出空间站,他们在气闸舱还未完全减压时就打开舱门。舱门打开时气体涌出,损坏了门的铰链,从而使他们在结束出舱活动后关舱门时遇到困难。此次出舱活动完成特别困难,6h 后他们匆忙返回气闸舱。当他们关舱门时发现舱门关不上,留有 2.5cm 大小的缝隙,不能为气闸舱重新加压。因此他们只能通过“量子-2”的应急气闸舱,关闭了内舱门。最终在 7h30min 时脱掉了航天服,而“和平”号空间站上的

表 1 俄罗斯航天员出舱活动主要故障和问题一览表

日期	航天器	航天员	时间	出舱活动中出现的故障
1965-03	“上升-2”	列昂诺夫	00:12	由于航天服充气后膨胀,航天员很难弯曲身体,返回气闸舱时遇到严重问题
1977-12	“联盟-26”,“礼炮-6”空间站	罗曼·尤里耶维奇·罗曼年科 戈列奇科	01:28	罗曼年科身上与气闸舱相连的安全系带松开,被戈列奇科发现后及时抓住,以后两人总是用脐带系在一起
1978-04	“联盟 TM-2”,“和平”号空间站	罗曼年科 拉维金	03:39	由于服装压力调节器的位置不便于固定,拉维金设法降低压力调节器的位置
1990-07	“联盟 TM-9”,“和平”号空间站	索沃维约夫、巴兰丁	07:00	“晶体-2”气闸门的舱门被损坏,航天员通过备用舱门出舱
1992-02	“联盟 TM-13”,“和平”号空间站	沃尔科夫、奥巴基罗夫	04:13	沃尔科夫服装热交换器失灵,依靠脐带通风
1993-09	“联盟 TM-17”,“和平”号空间站	齐布列耶夫 谢列布罗夫	01:51	齐布列耶夫服装的冷却系统失灵,出舱活动时间缩短
1993-10			00:37	谢列布罗夫服装供氧系统失灵,服装停止工作
1995-07	“联盟 TM-20”,“和平”号空间站	索沃维约夫、布达林	03:06	服装水冷系统发生问题,出舱活动未能完成
1997-11	“联盟 TM-26”,“和平”号空间站	索沃维约夫、维诺格拉多夫	06:06	“量子-2”舱的舱门漏气,航天员从备用舱门返回
1998-03	“联盟 TM-27”,“和平”号空间站	穆萨巴耶夫、布达林	00:00	航天员使用扳手用力过大,气闸舱舱门螺栓脱落,航天员未能出舱
2004-02	国际空间站	亚历山大·卡列里		在无人留守的情况下出舱活动,卡列里头盔内出现水汽,航天服内温度升高,不得不提前结束出舱活动

“海鹰”型出舱活动服设计的工作寿命是 8h。

1993 年 12 月,航天飞机 STS-61 上的舱门出现关闭障碍,影响航天员的出舱活动。

1996 年 11 月,航天飞机 STS-80 上气闸舱的舱门也出现问题,由于舱门门闩启动器被一颗松动的螺钉卡住,气闸舱门不能打开,航天员出不了舱。

目前气闸舱的设计主要考虑形状、空间大小、开关模式以及增减压速度等。随着技术的日益先进,气闸舱的设计趋于成熟。气闸舱技术的发展将围绕以下几个方面进行:(1)进一步提高舱门开启和关闭的灵活性,降低航天员出舱过程中的操作难度和体能消耗。同时,舱门的密封技术和检漏技术也是舱门技术的重要研究内容。(2)气闸舱和舱外航天服匹配设备的通用化设计。(3)气闸舱的多功能化。即出舱活动过程中,作为气闸舱使用,出舱活动结束后,继续

作为在轨运行舱段使用,从而提高设备的利用率。目前,在国际空间站上使用的是一种称为“探索”号联合气闸舱,这种气闸舱既能提供给穿美国出舱活动航天服的宇航员使用,又能提供给穿“海鹰”系列航天服的俄罗斯宇航员使用。在此之前,美国航天员只能通过航天飞机上的气闸舱进行出舱活动。这种联合气闸舱 2001 年 7 月与国际空间站的节点 1 号舱联结。为了完成出舱活动的任务,气闸舱内安装了专门的设备,用于航天员在进行从准备到结束出舱活动作业时的生命保障、气闸舱的增压和减压、舱门密闭性检查和信号通信等。

6 结束语

在所有设计要求中,出舱活动系统的安全性最重要。为保障航天员顺利、高效地完成出舱活动任

表 2 美国航天员出舱活动主要故障一览表

日期	航天器	航天员	时间	出舱活动中出现的故障
1966-06	“双子座-9”	尤金·赛尔南	02:08	由于航天员的工作负荷超过服装的冷却能力,头盔面窗上出现雾气,妨碍视力,背包式喷气装置试验被取消
1966-09	“双子座-11”	理查德·戈登	00:33	航天员在出舱活动中过度劳累而提前结束
1974-02	“天空实验室-4”	爱德华·吉布森 卡尔	05:19	航天员吉布森发现他的航天服生命保障系统的冷却液往外泄漏
1982-11	STS-5	艾伦·P·约瑟夫 威廉·B·勒努瓦	00:00	由于出舱活动航天服发生故障,航天员出舱活动被取消
1984-04	STS-41C	泰利·J·哈特 乔治·D·纳尔逊	02:53	载人机动装置停靠失败,未能固定住需要维修的卫星,维修任务失败
1985-04	STS-51D	杰弗里·A·霍夫曼 大为·格里格斯	03:10	在出舱活动中,航天员格里格斯不小心走过航天飞机机翼
1993-12	STS-61	托马斯·马斯格雷夫 杰弗里·A·霍夫曼	07:54	RSU 舱门关闭出现困难
1996-11	STS-80	托马斯·琼斯 塔马拉·杰尼根	00:00	由于舱门启动器被一颗松动的螺钉卡住,气闸舱门不能打开
2004-08	国际空间站	根纳德·伊凡诺维奇·帕 达尔卡 爱德华·芬克	04:30	两名航天员出舱活动时与地面之间的通信联络一度中断 20 分钟
2007-02	国际空间站	洛佩斯·阿来戈里亚 苏尼塔		有毒氨气泄漏,他们避开有毒气体并按照地面任务控制中心的指示,把氨气液体管线转移到永久性系统
2006-09	“亚特兰蒂斯”	罗伯特·克比姆		由于操作失误一根带子以及弹簧和清洗机失去控制,可能对空间站的桁架和管道造成损坏。与空间站对接时氨冷却剂泄漏。
2007-08	STS-118	克莱顿·安德森 里克·马斯特拉基奥		马斯特拉基奥的手套外层出现破损,基于安全考虑,两人被迫提前返回
2007-08	STS-118	克莱顿·安德森 戴夫·威廉斯		由于担心颶风“迪安”可能威胁航天飞机的返航,航天员的出舱活动提前了 44 分钟,并且比原计划缩短了 1 小时 28 分钟

务,要减小使用中的人为失误,完善出舱活动系统的环境测试设备,完善气闸舱的工效设计,完善出舱航天服的使用功能,制定出更系统全面的出舱活动系统的设计标准。在充分吸收国外航天员出舱活动的经验,借鉴并分析出舱活动的故障,结合我国载人航天的实际情况,解决我国航天员出舱活动存在的关键技术问题,实现我国航天员安全高效的出舱活动任务。◇

参考文献

- [1] 陈善广. 航天员出舱活动技术. 中国宇航出版社. 2006
- [2] 国防科技名词大典. 航天航空工业出版社. 2001
- [3] 出舱活动系统研究. 中国航天科技集团公司五一二所. 2003
- [4] 周前祥. 载人航天中人的失误分析及研究对策. 中国空间科学技术. 2003 年第 6 期
- [5] 都亨. 载人航天与空间环境预报.
- [6] 丁立. 舱外航天手套关键技术的研究状况. 哈尔滨工业大学学报. 2000 年第 1 期