

# 舱外服活门组件密封粘接研究

唐波 周雨琪 孙春燕 许勇 段文鹏 陈风波

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**文 摘** 针对舱外服活门组件的密封粘接及工作环境要求,对HXJ-14、HYJ-51和FHJ-75三种增韧改性环氧胶黏剂开展了特种胶黏剂选型及典型环境性能研究、典型粘接样件粘接面结构设计和粘接工艺优化研究。结果表明:优选出的HYJ-51胶黏剂具有良好的粘接性能、耐交变温度循环性能、耐湿热环境性能、耐介质浸泡性能,满足舱外服活门组件密封粘接要求。在典型活门粘接组件中,控制聚四氟乙烯滑套和不锈钢阀体的配合间隙为0.1~0.15 mm,并且在不锈钢阀体粘接面上增加环形槽结构,可以有效减少粘接面的缺胶面积,避免形成贯穿性通道,提高活门组件粘接的密封可靠性。经过产品生产验证,实现了活门组件的可靠密封粘接,成功用于航天员舱外服生命保障系统。

**关键词** 舱外服,密封粘接,胶黏剂优选,粘接工艺

中图分类号:TQ433.4

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.013

## Adhesive Seal of Valve Assemblies for EVA Spacesuit

TANG Bo ZHOU Yuqi SUN Chunyan XU Yong DUAN Wenpeng CHEN Fengbo

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** According to the requirements of seal bonding and working environment for valve assemblies of extravehicular activity (EVA) spacesuits, the adhesive selection and optimization, performances in typical environments, the structure design of the bonding surface of typical bonding samples and the optimization of the bonding process were carried out on three toughened epoxy adhesives HXJ-14, HYJ-51 and FHJ-75. The results show that HYJ-51 adhesive has good bonding properties, resistance to alternating temperature cycles, resistance to humidity and medium immersion, and therefore meets the sealing and bonding requirements for EVA spacesuits. For the typical valve assembly bonding, the gap between the PTFE slide and the stainless-steel valve body is designed to be 0.1 to 0.15 mm. An annular groove structure added to the bonding surface of the stainless-steel valve body, which can effectively reduce the defects of the bonding surface, avoid the formation of penetrating channels, improve the sealing reliability of the valve assembly bonding, and consequently meet the design requirements of the valve assembly.

**Key words** EVA spacesuit, Adhesive seal, Adhesive optimization, Bonding technology

### 0 引言

舱外航天服(简称舱外服)是航天员进行出舱活动的关键装备。航天员出舱活动时 would 面临近地轨道等严酷的交变温度环境,舱外服可以为航天员提供适宜生命活动和作业所需的热舒适条件,为航天员出舱提供生命保障<sup>[1]</sup>。舱外服由专用气路和液路与母船相连,气、液路中装有大量的活门,调节和控制气、液的供给<sup>[2-3]</sup>。为了保证活门的灵活开闭和调节,目前舱外服中气、液路的活门组件(如图1所示,包括阀体、阀杆、顶针、衬套等)广泛采用金属内或外衬耐腐蚀、低摩擦因数聚四氟乙烯塑料的结构设计。

聚四氟乙烯与金属之间采用特种胶黏剂进行粘接固定,不仅需要粘接牢固,而且粘接面需实现气密和水密,满足航天员出舱工作的要求。为此,本文针对舱外服活门组件中聚四氟乙烯与金属密封粘接及管路工作环境的要求,开展了特种胶黏剂选型研究和活门组件粘接工艺优化设计研究,以标准粘接试样和典型活门粘接件为主要研究对象,通过粘接及典型环境的性能测试,确定优选的特种胶黏剂,并在此基础上,通过优化粘接面结构设计和粘接工艺参数,最终实现舱外服活门组件的可靠密封粘接。

收稿日期:2021-09-01

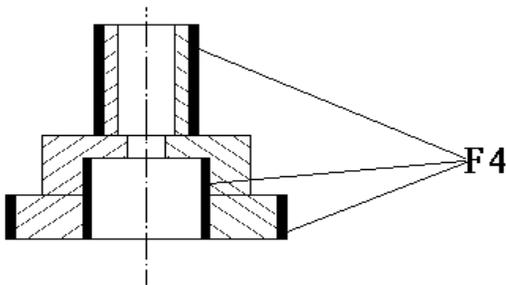
第一作者简介:唐波,1968年出生,硕士,高级工程师,主要从事航天特种胶黏剂及粘接工艺研究工作。E-mail:13801359591@163.com



图1 典型活门组件产品  
Fig. 1 Typical valve assemblies

## 1 实验

为了实现舱外服活门组件的密封粘接,选取具有代表性的气液组合插座液路阀开展密封粘接研究,气液组合插座液路阀结构如图2所示。



注:黑色部位为聚四氟乙烯塑料(F4),其余部位为1Cr8Ni9Ti不锈钢。聚四氟乙烯与不锈钢之间采用胶黏剂粘接的方式进行组装。

图2 气液组合插座液路阀结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the gas-liquid combined socket in a liquid valve

气液组合插座液路阀是舱外服的液路阀,由不锈钢阀体和聚四氟乙烯滑套组成,阀体和滑套采用胶黏剂密封连接。其工作介质为含 $Ag^+$ 的水,工作温度一般为常温,最低工作温度 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,工作压力 $160\text{ kPa}$ ,需长时工作。气液组合插座液路阀要求粘接牢固,粘接面密封,即 $-50\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不通水的环境试验中,当检测气压力为 $0.3\text{ MPa}$ 时,气检不漏。要达到上述要求,首先胶黏剂要满足与金属和聚四氟乙烯有较好的粘接性能,并且具有较好的耐环境、耐介质(含 $Ag^+$ 的水)性能;其次,需采用适宜的粘接工艺进行活门组件的粘接,提高活门组件的密封可靠性,满足活门组件的粘接密封要求。

由于该研制任务要求在航天型号成熟应用的胶黏剂中开展选型工作,因此,根据气液组合插座液路阀的工作环境及其耐介质和粘接对象的特点,在成熟应用的增韧改性环氧胶黏剂中进行胶黏剂优选研究<sup>[4-5]</sup>。聚四氟乙烯为难粘材料,粘接前需对其粘接面进行表面活化处理<sup>[6-7]</sup>,所有不锈钢粘接面均采用吹砂处理。

### 1.1 材料

原材料主要有HXJ-14、HYJ-51和FHJ-75增韧改性环氧胶黏剂,萘-钠表面处理液,1Cr18Ni9Ti不锈钢拉剪强度试片,自制;含 $Ag^+$ 的水,航天医学工程研究所。

### 1.2 测试方法

胶黏剂拉剪强度依据国标GB/T7124-2008胶黏剂拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)进行;破坏力试验采用CMT5105型电子万能试验机进行;粘接密封性采用气泡法进行,即在 $-50\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不通水的环境试验中,检测气压力为 $0.3\text{ MPa}$ 时,肥皂水气检不漏。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 粘接用胶黏剂优选

用于舱外服阀门粘接用胶黏剂性能主要包括胶黏剂的粘接性能、耐交变温度循环性能、耐湿热环境性能和耐介质性能,在成熟应用的HXJ-14、HYJ-51和FHJ-75三种增韧改性环氧胶黏剂中,通过胶黏剂性能试验,对三种胶黏剂在各种环境条件下的性能对比,优选出用于活门粘接的胶黏剂。

#### (1) 粘接性能测试

经受力分析可知,粘接后液路阀组件主要是受剪切力的作用,因此,选取拉剪强度测试作为胶黏剂粘接性能表征依据。以不锈钢-聚四氟乙烯-不锈钢(两片1Cr18Ni9Ti不锈钢试片的中间夹一层聚四氟乙烯的薄膜)为粘接对象,分别进行HXJ-14、HYJ-51和FHJ-75胶黏剂室温和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 拉剪强度测试,考察胶黏剂的粘接性能。

#### (2) 耐交变温度循环性能测试

为了考察胶黏剂经历交变温度循环后的性能,根据气液组合插座液路阀相关技术条件要求,对三种胶黏剂粘接的剪切强度试样和液路阀的典型模拟件进行 $-50\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度循环试验。经两次温度循环后,测试试样的剪切强度和典型模拟件拉开所用的力(破坏拉力)。典型模拟件如图3所示。

#### (3) 耐湿热环境性能测试

对三种胶黏剂粘接的剪切强度试样和液路阀的典

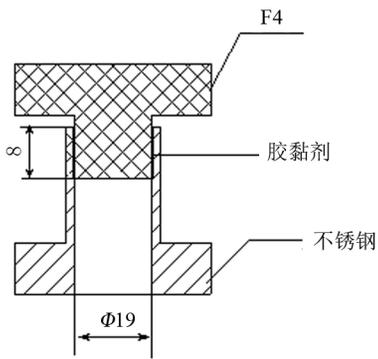


图3 模拟件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a simulation sample

型模拟件进行从20℃升温至35℃,在35℃、95RH%的环境中保持24h,再降至20℃,经两次循环后进行性能测试。考察胶黏剂在湿热条件下的性能变化。

#### (4) 耐工作介质性能测试

液路阀工作介质为含 $Ag^+$ 的水,因此需开展粘接试样和典型样件的室温浸泡试验,浸泡介质为含 $Ag^+$ 的水,浸泡试验时间为7d。对浸泡后的试样进行性能测试,测试试样的剪切强度和典型模拟件拉开所用的力,考察介质浸泡对胶黏剂性能的影响。

#### 1.3.2 粘接工艺研究

粘接工艺是影响活门密封性能的关键因素<sup>[8]</sup>,主要包括不锈钢阀体与聚四氟乙烯滑套间的配合间隙和不锈钢阀体与聚四氟乙烯滑套粘接面的结构,因此在优选的胶黏剂基础上,开展以下试验研究粘接工艺对活门密封性能的影响。

首先,在不控制不锈钢阀体与聚四氟乙烯滑套间的配合间隙的情况下,对不锈钢阀体的粘接面进行吹砂粗化处理,聚四氟乙烯滑套的粘接面进行钠-萘处理液处理,然后用优选的胶黏剂进行典型样件的粘接固化;第二,设计加工典型的粘接模拟件,在保持不锈钢阀体尺寸固定的前提下,改变聚四氟乙烯滑套直径,控制粘接间隙分别为0.05、0.1、0.15、0.175mm,每种尺寸各加工6套,不锈钢和聚四氟乙烯界表进行相应的处理,用优选的胶黏剂进行典型模拟样件的粘接固化;第三,根据胶接密封接头的特点和接头设计优化方法<sup>[9-10]</sup>,在不锈钢阀体的粘接面上设计两道深度0.5mm、宽度1.5mm的环形沟槽,聚四氟乙烯滑套和不锈钢阀体的粘接间隙为0.1~0.15mm,涂胶时将胶黏剂填满沟槽和粘接面,进行典型模拟件的粘接固化。上述三种试验的模拟样件,固化完成后,进行0.3MPa气检,然后解剖,观察胶接界面。

## 2 结果分析及讨论

### 2.1 粘接用胶黏剂优选结果

#### 2.1.1 胶黏剂粘接性能

胶黏剂粘接性能测试结果如表1所示。

表1 三种胶黏剂的拉剪强度

Tab. 1 Lap-shear strength of three adhesives

胶黏剂牌号	拉剪强度/MPa	
	室温	-40℃
HXJ-14	14.2	19.0
HYJ-51	16.1	22.4
FHJ-75	16.8	20.8

这三种胶黏剂均为室温固化结构胶黏剂,本身就具有较高的粘接强度。试验结果看,与处理后的聚四氟乙烯和不锈钢均有较好的粘接性能,拉剪强度满足液路阀的粘接要求。其中HYJ-51胶黏剂和FHJ-75胶黏剂优于HXJ-14胶黏剂。

#### 2.1.2 交变温度对胶黏剂性能的影响

经历交变温度循环后胶黏剂的粘接性能测试结果如表2所示。

表2 经历交变温度循环后胶黏剂的粘接性能

Tab. 2 Adhesive performance after undergoing alternating temperature cycles test

胶黏剂牌号	拉剪强度/MPa		破坏拉力/kN
	室温	-40℃	
HXJ-14	13.4	17.3	1.96
HYJ-51	15.5	20.1	3.31
FHJ-75	14.7	19.8	3.39

对比表1和表2中的结果可以看出,胶黏剂经交变温度循环后,粘接性能略有下降,HYJ-51性能变化更小。HXJ-14、HYJ-51和FHJ-75胶黏剂为增韧改性环氧胶黏剂,耐低温性能较好,温循高温仅60℃,远低于环氧胶黏剂的耐温范围,因此经历两次温循,胶黏剂性能仅有小幅下降,交变温度对胶黏剂影响较小。

#### 2.1.3 湿热对胶黏剂性能的影响

经两次湿热循环后胶黏剂的耐湿热性能测试结果如表3所示。

对比表1和表3中的结果可以看出,经湿热循环后,三种胶黏剂的粘接性能均有所下降,但是仍然大于10MPa,模拟件的破坏拉力都大于3kN,满足液路阀的粘接要求。由于HYJ-51、FHJ-75胶黏剂采用的是咪唑类固化剂,固化物有较高的聚合度和更紧密的三维空间网状结构,而HXJ-14胶黏剂采用低分子聚酰胺为固化剂,固化物聚合度较低,局部为线性结构,同时含有耐水性较差的胺官能团,因此经湿热循环后,HYJ-51、FHJ-75胶黏剂粘接性能要优于HXJ-14胶黏剂。

表3 经历湿热循环试验后胶黏剂的粘接性能

Tab. 3 Adhesive performance after damp heat cycle test

胶黏剂牌号	拉剪强度/MPa	破坏拉力/kN
HXJ-14	11.0	3.34
HYJ-51	13.1	3.53
FHJ-75	12.9	3.55

### 2.1.4 工作介质浸泡对胶黏剂性能的影响

对工作介质浸泡后的试样进行粘接性能测试,其结果如表4所示。

表4 经历工作介质浸泡后胶黏剂的粘接性能

Tab. 4 Adhesive performance after soaking in working medium

胶黏剂牌号	拉剪强度/MPa	破坏拉力/kN
HXJ-14	8.91	3.19
HYJ-51	14.6	3.35
FHJ-75	15.1	3.10

经历工作介质浸泡7 d后,三种胶黏剂的拉剪强度均有所下降,与表1中的结果相比,HXJ-14胶黏剂拉剪强度下降5.3 MPa,下降了37.31%;HYJ-51胶黏剂下降1.5 MPa,下降了9.32%;FHJ-75胶黏剂下降1.7 MPa,下降了10.12%。进一步说明采用咪唑类固化剂的HYJ-51胶黏剂和FHJ-75胶黏剂耐水性

表5 气压泄漏试验结果

Tab. 5 Test results air pressure leak

间隙/mm	安装情况	显微镜观察结果	泄漏数量/个
0.05	装入困难,聚四氟乙烯套管装入后不能转动	有局部缺胶,缺胶无规律,有摩擦痕迹	2
0.1	装入容易,聚四氟乙烯套管装入后易转动	有局部缺胶,有少量摩擦痕迹	0
0.15	装入容易,聚四氟乙烯套管装入后易转动	有局部缺胶,无摩擦痕迹,粘接面完整	0
0.175	装入容易,聚四氟乙烯套管装入后易转动	有局部缺胶,无摩擦痕迹,粘接面完整,胶层偏厚	0

通过控制聚四氟乙烯滑套和不锈钢阀体的间隙,可以改善粘接组件的密封性能。当间隙较小如为0.05 mm时,装配过程中粘接面的胶黏剂容易被挤走,造成缺胶,配合间隙中残留的胶黏剂量很少,没有足够的胶黏剂通过浸润、扩散填充空隙,缺胶部位一旦形成则很难弥补。因此,适当增大聚四氟乙烯滑套和不锈钢阀体的配合间隙,可以确保粘接面有足够的胶黏剂避免出现缺胶部位。同时扩大配合间隙,在装配过程中聚四氟乙烯滑套可以在阀体中转动,能进一步有效阻断贯穿性通道,保证胶接组件的密封。通过上述工艺试验可知,控制聚四氟乙烯滑套和不锈钢阀体的配合间隙为0.1~0.15 mm有助于提高粘接组件的密封性。

### 2.2.2 粘接面结构对密封性能的影响

控制配合间隙为0.1~0.15 mm,不锈钢阀体粘接面开两道环形槽,进行了20件该典型模拟件的粘

能明显优于采用低分子聚酰胺固化剂的HXJ-14胶黏剂。HYJ-51胶黏剂和FHJ-75胶黏剂耐工作介质浸泡性能相当,介质浸泡对其性能影响较小。

通过上述试验可知,HYJ-51胶黏剂和FHJ-75胶黏剂粘接性能、耐交变温度循环性能、耐湿热环境性能和耐介质性能均满足活门组件密封粘接要求。由于HYJ-51胶黏剂黏度大于FHJ-75胶黏剂,并且触变性好,不易流淌,粘接面涂胶后不易流空,其良好的施工工艺性更适合用于套管状粘接面粘接,因此确定采用HYJ-51胶黏剂用于舱外服活门组件密封粘接。

## 2.2 粘接工艺研究

### 2.2.1 粘接配合间隙对密封性能的影响

不控制不锈钢阀体与聚四氟乙烯滑套间的配合间隙的情况下,粘接的10件典型样件中有5件发生泄漏。将发生泄漏的活门组件沿轴向剖开,分离聚四氟乙烯和不锈钢组件。在显微镜下观察发现,聚四氟乙烯表面的胶层存在缺胶,并形成了通道,缺胶位置和漏点位置一致。缺胶部位边界比较清晰,并没有观察到胶黏剂破坏的痕迹。由此可知,这些活门组件泄漏主要是由于粘接面有局部缺胶,形成了贯穿性通道。控制粘接间隙分别为0.05、0.1、0.15、0.175 mm,固化完成后,试验结果如表5所示。

接试验,固化后进行气检,典型模拟件全部达到密封要求。图4是典型模拟样件剖开分离的粘接面状态。

胶黏剂搅拌、涂胶和装配过程中难免会夹带少量微小气泡,这些带入的气体在胶黏剂固化过程中易在



图4 开环形槽模拟件的粘接面形貌

Fig. 4 The morphology of the bonding surface of the simulation sample with ring grooves

粘接面移动聚集,形成空腔。胶接面存在的缺胶和空腔一旦贯通,必然会导致组件泄漏。涂胶时将胶黏剂填满沟槽,沟槽中能存有较多的胶黏剂,装配完成后,在表面张力的作用下,能保证胶黏剂对空隙部位进行浸润填充,减少缺胶面积,同时由于增加了环型沟槽,沟槽中充满的胶黏剂可以有效阻断混入的微小气泡形成贯穿通道。从解剖的样件看,有环形槽的试验件胶层密实,虽然仍存在局部缺胶的现象,但很难形成贯穿性通道,从而提高粘接的密封可靠性。

### 2.2.3 产品生产验证

按聚四氟乙烯滑套和不锈钢阀体的配合间隙为0.1~0.15 mm,不锈钢阀体粘接面有环形槽的优化设计结构,进行了一批正式产品的胶接装配,如图5所示逐件检测,所有产品均满足设计要求,实现了活门组件的可靠密封粘接,成功用于航天员舱外服生命保障系统。



图5 聚四氟乙烯塑料与不锈钢阀体粘接产品图

Fig. 5 Product pictures of assemblies made of bonded PTFE plastic and stainless steel

### 3 结论

通过对HXJ-14、HYJ-51和FHJ-75三种增韧改性环氧胶黏剂的粘接性能试验,以及在交变温度循环、湿热环境、介质浸泡环境条件下对胶黏剂的影响研究,优选出适用于活门粘接的HYJ-51胶黏剂,其各项性能均能满足活门的工作要求;通过优化典型模拟样件的粘接结构,确定了聚四氟乙烯滑套和不锈钢阀体合理的粘接配合间隙为0.1~0.15 mm,并且在不锈钢阀体粘接面上增加了环形沟槽。采用以上工艺粘接活门组件,可以有效减少粘接面的缺胶面积,避免形成贯穿性通道,提高活门组件粘接的密

封可靠性。该粘接工艺合理,操作容易,密封可靠性高,所粘接的活门产品均能满足设计要求。

### 参考文献

- [1] 李潭秋. 飞天舱外航天服的研制[J]. 载人航天, 2008(4):8-18
- [2] LI Tanqiu. Development of flying extravehicular space suit [J]. Manned Spaceflight, 2008(4): 8-18.
- [3] 张万欣,王涛,王海亮等. 舱外航天服液温调节特性试验研究[J]. 航天医学与医学工程, 2014, 27(1):37-42
- [4] ZHANG Wanxin, WANG Tao, WANG Hailiang, et al. Experimental study on liquid temperature modulation characteristics of EVA spacesuit [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2014, 27(1):37-42.
- [5] 沈力平,吴志强. 舱外航天服环境控制与生命保障技术[J]. 载人航天, 2004(3):6-12
- [6] SHEN Liping, WU Zhiqiang. Environmental control and life support technology of extravehicular spacesuit [J]. Manned Spaceflight, 2004(3): 6-12.
- [7] 赵云峰. 高性能胶黏剂密封剂在航天工业领域的应用[J]. 化学与粘合, 2014(6):446-450
- [8] ZHAO Yunfeng. Application of high-performance adhesives and sealants in aerospace industry [J]. Chemistry and Adhesion, 2014(6): 446-450.
- [9] 赵飞明,赵云峰,陈江涛. 航天胶黏剂的性能与应用[J]. 粘接, 2014(12):42-45
- [10] ZHAO Feiming, ZHAO Yunfeng, CHEN Jiangtao. Performance and application of aerospace adhesive [J]. Adhesion, 2014(12):42-45.
- [11] 徐保国,王建伟,王文浩. 氟塑料表面粘接与应用[J]. 工程塑料应用, 1998(3):9-11
- [12] XU Baoguo, WANG Jianwei, WANG Wenhao. Adhesion and application of fluoroplastics [J]. Engineering Plastics Application, 1998(3): 9-11.
- [13] 周洪庆,杨南如,凌志达. PTFE基复合材料表面改性研究[J]. 功能材料, 1998(3):107-109
- [14] ZHOU Hongqing, YANG Nanru, LING Zhida. Research of surface modification of PTFE-based composites [J]. Journal of Functional Materials, 1998(3): 107-109.
- [15] 郑瑞琪,刘清方. 航空工业结构粘接质量控制[J]. 粘接, 2004(2):39-42
- [16] ZHENG Ruiqi, LIU Qingfang. Quality control of structural bonding in aviation industry [J]. Adhesion, 2004(2): 39-42.
- [17] 颜静. 高可靠的金属-塑料阀芯密封结构设计[J]. 通用机械, 2003(1):59-60
- [18] YAN Jing. Highly reliable metal-plastic valve core sealing structure design. General Machinery, 2003(1):59-60.
- [19] 潘思曦. 胶接接头设计及检验方法[J]. 机械管理开发, 2010(1):43-45
- [20] PAN Sixi. The design and verify method of cement lap [J]. Mechanical Management and Development, 2010(1): 43-45.