

# SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING 中文核心期刊 中国科技核心期刊

推进剂贮箱箱底密封外焊罩结构设计及焊接热效应实验研究

冷月 卢松涛 肖士利 张曙辉 李吉

# Structural design of sealed outer welding cover and experimental study on welding thermal effect for the propellant tank bottom

LENG Yue, LU Songtao, XIAO Shili, ZHANG Shuhui, LI Ji

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12126/see.2023076

# 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

# 温度循环试验中试件表面结霜/露现象及舱内水分来源的实验研究

Experimental study of the condensation and identifiation of the moisture source during thermal cycling test 航天器环境工程. 2019, 36(5): 468-474 https://doi.org/10.12126/see.2019.05.010

# 推进剂贮箱金属焊接件疲劳裂纹对应力强度因子影响的数值分析

Numerical analysis of fatigue crack vs. stress impact factor of metal welded joint for satellite propellant tank 航天器环境工程. 2019, 36(3): 247-251 https://doi.org/10.12126/see.2019.03.008

# 卫星充放电效应对典型星载电子设备影响的实验研究

Experimental study of the effects of spacecraft charging and discharging on typical satellite-borne electric instrument 航天器环境工程. 2021, 38(3): 370-374 https://doi.org/10.12126/see.2021.03.019

# 高能电子辐照下聚合物介质深层放电实验研究

Experimental study of deep dielectric discharging of polymer under energetic electron irradiation 航天器环境工程. 2017, 34(3): 295–300 https://doi.org/10.12126/see.2017.03.012

# 含冰模拟月壤水资源提取实验研究

Experimental study of water resource extraction from frozen lunar regolith simulants 航天器环境工程. 2020, 37(5): 511-518 https://doi.org/10.12126/see.2020.05.015

# 玻璃钢空间碎片防护构型性能的实验研究与仿真分析

Experimental and analytical studies of the performance of FRP protective configuration against space debris 航天器环境工程. 2019, 36(2): 120–125 https://doi.org/10.12126/see.2019.02.003

https://www.seejournal.cn

E-mail: htqhjgc@126.com

Tel: (010)68116407, 68116408, 68116544

# 推进剂贮箱箱底密封外焊罩结构设计及 焊接热效应实验研究

冷月,卢松涛,肖士利,张曙辉,李 吉 (北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

摘要:为对运载火箭推进剂贮箱箱底传感器及阀门管路与贮箱箱底法兰的密封面实现备保密封,提 出一种密封外焊罩结构。并针对箱底传感器对于外焊罩焊接热效应承受能力较低的风险,开展外焊罩焊 接热效应摸底实验,制定焊接过程的散热方案,确定焊接时间、焊接时间间隔等工艺参数,以期为后续 传感器外焊罩箭上焊接提供技术支持。

关键词:密封外焊罩;焊接热效应;散热方案;焊接时间;实验研究 中图分类号:TB42;V416.2 文献标志码:A 文章编号:1673-1379(2023)06-0630-06 DOI:10.12126/see.2023076

# Structural design of sealed outer welding cover and experimental study on welding thermal effect for the propellant tank bottom

LENG Yue, LU Songtao, XIAO Shili, ZHANG Shuhui, LI Ji (Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: A sealed outer welding cover structure for sensors and pipelines at the bottom of the propellant tank of a launch vehicle to provide protective seal for the sealing surfaces between sensors & valve pipelines and tank bottom flange was proposed. In view of the risk of low capability of the tank bottom sensor to withstand the welding thermal effect of the outer welding cover, a thorough experiment was carried out. A heat dissipation plan for the welding process was developed. Process parameters such as welding time and heat dissipation time were determined. The proposed research may provide a technical support for the subsequent welding of the outer welding cover for sensors on the launch vehicle.

Keywords: sealed outer welding cover; welding thermal effect; heat dissipation scheme; welding time; experimental study

收稿日期: 2023-05-20; 修回日期: 2023-11-24 基金项目: 运载火箭型号项目支持

引用格式:冷月,卢松涛,肖士利,等.推进剂贮箱箱底密封外焊罩结构设计及焊接热效应实验研究[J]. 航天器环境工程, 2023,40(6):630-635

LENG Y, LU S T, XIAO S L, et al. Structural design of sealed outer welding cover and experimental study on welding thermal effect for the propellant tank bottom[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(6): 630-635

# 0 引言

运载火箭使用的推进剂主要是硝基氧化剂和 肼类燃料,其具有强烈的腐蚀性和易燃、易爆、易挥 发性及毒性<sup>[1]</sup>,一旦发生爆炸或推进剂泄漏事故,有 毒推进剂的逸散会对人员安全和环境造成巨大危 害,甚至影响航天任务的成败<sup>[2]</sup>。我国航天发射试 验中曾发生过多起由于推进剂泄漏引起的事故<sup>[3]</sup>。 目前,对于推进剂稳定可靠贮存的要求越来越高<sup>[4]</sup>, 对贮存系统中贮箱、气瓶、管路和阀门等部件提出 了严格的漏率要求。密封是防止和处理泄漏最常用 的方法<sup>[3]</sup>。新一代运载火箭对密封材料及结构提出 了新的挑战<sup>[5]</sup>,如耐温范围要求达到 80~600 K,超 低温下密封漏率要求更低,而常规型号运载火箭所 使用的橡胶密封圈<sup>[6]</sup>、金属密封圈<sup>[7]</sup>等密封结构很 难同时满足这些条件<sup>[8]</sup>。

为提高航天工程中密封系统的密封安全可靠 性,本文提出一种用于运载火箭推进剂贮箱箱底传 感器及阀门管路的密封外焊罩结构,对传感器及阀 门管路与贮箱箱底法兰的密封面实现备保密封。不 同于阀门管路等结构类产品,传感器内部有导线、 焊点、橡胶圈、环氧胶等热敏感元件,对于焊接产生 的热效应承受能力较低。因此需要研究焊接工艺对 焊接热效应的影响,从而通过调整工艺参数实现对 焊接热的控制。目前焊接工艺对焊接热效应影响的 研究大多是旨在降低焊接残余应力及结构变形等 的力学性能理论或仿真研究<sup>[9-10]</sup>, 而通过焊接工艺 实验控制焊接结构件温度的研究较少。因此,本文 针对箱底传感器对于外焊罩焊接热效应承受能力 较低的风险,开展外焊罩焊接热效应摸底实验,制 定焊接过程的散热方案,确定焊接时间、焊接时间 间隔等工艺参数,以期为后续传感器外焊罩箭上焊 接提供技术支持。

#### 1 密封外焊罩结构设计

安装于运载火箭推进剂贮箱箱底的部件包括 测量推进剂液位的传感器、加注阀门及相应管路 等。为增强密封可靠性、降低密封漏率,传感器及 阀门管路与贮箱箱底法兰通过密封圈密封后,需要 在密封面外焊接环形外焊罩,实现备保密封。外焊 單的结构形式见图 1,外焊罩一侧与安装于贮箱箱 底的传感器或阀门管路焊接,另一侧与贮箱法兰焊 接。传感器及阀门管路采用不锈钢材料,贮箱采用 铝合金材料。为了提高焊接质量、降低焊接难度, 应采用同种金属焊接,因此外焊罩与以上 2 种金属 材料焊接的对应部位须采用对应的金属材料制成。 外焊罩由不锈钢和铝合金异种金属通过搅拌摩擦 焊焊接而成。



图 1 密封外焊罩结构 Fig. 1 Structure of the sealed outer welding cover

### 2 焊接热效应实验系统的建立

为摸清密封外焊罩焊接工艺对传感器的影响, 开展焊接热效应实验。实验系统由箱底传感器样 机、贮箱法兰模拟件、外焊罩、焊接工装及温度采 集系统等组成,如图2所示。实验室内环境温度为 18℃左右。



图 2 外焊罩焊接热效应实验系统

Fig. 2 Test system of welding thermal effect for the outer welding cover

根据传感器上敏感元件及关键电路的位置,在 传感器样机上设置 20 个温度测点,测点分布见图 3。 其中,测点 1~5 分布在传感器上盖上,测点 6~14 分布在传感器导管组件上,测点 15~20 分布在传 感器导管内的印制电路板上。



图 3 传感器样机温度测点分布

Fig. 3 Temperature measurement points distribution on the sensor prototype

#### 3 实验过程

为减小外焊罩焊接热对传感器的影响,采用分 段焊接及分段散热的工艺方法。焊接过程中,全程 实时监测传感器上测点温度变化情况,从而确定适 当的焊接时间、散热时间等。传感器密封外焊罩焊 接热效应实验过程如下:

1) 传感器样机、贮箱法兰模拟件、外焊罩与焊 接工装安装,用弹簧卡钳将外焊罩与贮箱法兰模拟 件夹紧定位,见图 4。



图 4 外焊罩与贮箱法兰模拟件焊接前夹紧定位

Fig. 4 Clamping and positioning of simulated outer welding cover and tank flange before welding

2)为防止外焊罩与贮箱法兰模拟件发生相对 错动,正式焊接前,先在外焊罩与贮箱法兰模拟件 对接面上点焊8个定位点,焊接定位点前温度采集 设备即开始工作,见图5。



图 5 外焊罩与贮箱法兰模拟件定位焊接

Fig. 5 Tack welding between simulated outer welding cover and tank flange

3)8个定位点将外焊罩与贮箱法兰模拟件对接 面焊接环缝均分为8段后,采用不填丝的熔焊氩弧 焊逐段焊接。每段焊接完成后,采用低压气源对焊 接部位进行通风散热,待测点温度不再上升后,再 开展下一段的焊接操作。由起初几段焊接过程的温 度测点数据发现焊接带来的加热效应并不严酷,因 此后续焊接过程中逐步缩短每段的散热时间,最后 3段焊接操作之间未通风散热,合并至所有焊接完 成后再进行通风散热。焊接及散热时间见表1所 示。外焊罩与贮箱法兰模拟件正式焊接完成后的情 况见图 6。

表 1 外焊罩与贮箱法兰模拟件焊接及散热时间

 Table 1
 Welding time and heat dissipation time of simulated outer welding cover and storage tank flange

焊接段	焊接时间/s	散热时间/s
1	20	436
2	28	550
3	36	380
4	30	349
5	34	183
6~8	198	1000



图 6 外焊罩与贮箱法兰模拟件正式焊接完成

Fig. 6 Finished welding between simulated outer welding cover and tank flange

4)同样,为防止外焊罩与传感器样机发生相对 错动,外焊罩与传感器样机正式焊接前,在对接面 上点焊7个定位点,焊接定位点前温度采集设备即 开始工作,见图7。



图 7 外焊罩与传感器样机定位焊接

Fig. 7 Positioning welding between outer welding cover and sensor prototype

5)7个定位点将外焊罩与传感器样机对接面焊 接环缝分为7段后,采用不填丝的熔焊氩弧焊逐段 焊接。每段焊接完成后,采用低压气源对焊接部位 进行通风散热,待测点温度不再上升后,再开展下 一段的焊接操作。由于焊接造成的加热效应并不严 酷,焊接完成后未进行长时间通风散热。焊接及散 热时间见表2所示。外焊罩与传感器样机正式焊接 完成后的情况见图8。

表 2 外焊罩与传感器样机焊接及散热时间

 Table 2
 Welding time and heat dissipation time of outer welding cover and sensor prototype

焊接段	焊接时间/s	散热时间/s
1	35	200
2	41	182
3	35	206
4	39	142
5	40	138
6	40	142
7	51	127



图 8 外焊罩与传感器样机正式焊接完成

Fig. 8 Finished welding of outer welding cover and sensor prototype

### 4 实验结果及分析

#### 4.1 外焊罩与贮箱法兰模拟件定位焊接

外焊罩与贮箱法兰模拟件定位焊接时,测点 6、7、8、9、15、16靠近焊接热影响区域,温度变化 明显,需关注(其他测点温度变化不明显,不再分 析)。其中测点 6、7、8、9位于传感器法兰上,测点 15、16位于传感器导管内的印制电路板上。各测点 温度随时间变化曲线见图 9,测温时间步长为 1.5 s, 下同。可以看到:焊接过程中,各测点都有一定的 温升,最高温度均在 31 ℃ 以下,最大温升不超过 10 ℃;由于距焊接位置较远且自身比热容较高等原 因,位于印制板上的测点 15、16 的温升相对较小, 较传感器法兰上测点的温升小 50% 左右。



图 9 外焊罩与贮箱定位焊接温度变化曲线

Fig. 9 Temperature variations of measurement points during positioning welding between outer welding cover and storage tank flange

#### 4.2 外焊罩与贮箱法兰模拟件正式焊接

外焊罩与贮箱法兰模拟件正式焊接时,测点 6、7、8、9、15、16的温度随时间变化曲线见图 10。 可以看到:焊接过程中,各测点都有一定的温升,最 高温度均在 60 ℃ 以下,最大温升不超过 30 ℃;焊 接完成后经长时间通风散热,测点温度明显下降; 安装在印制板上的测点 15、16 的温升相对较小,温 度变化曲线更为平滑,温升比较连续,与传感器法 兰上测点间的差距已不明显。



图 10 外焊罩与贮箱正式焊接温度变化曲线

Fig. 10 Temperature variations of measurement points during formal welding beteen outer welding cover and tank flange

#### 4.3 外焊罩与传感器样机定位焊接

外焊罩与传感器样机定位焊接时,测点1、3、 4、5、15、16 靠近焊接热影响区域,温度变化明显, 需关注(其他测点温度变化不明显,不再分析)。其 中测点1、3、4、5 位于传感器法兰上,测点15、16 位于传感器导管内的印制电路板上。各测点温度随 时间变化曲线见图11。可以看到:焊接过程中,各 测点都有一定的温升,最高温度均在45℃以下,最 大温升不超过 15 ℃; 安装在印制板上的测点 15、16 的温度先下降后上升, 这是因为印制板为非金属材 料, 对外界温度变化反应较金属迟钝, 刚开始的温 度下降是由上一阶段焊接工作完成后通风散热造 成的。



图 11 外焊罩与传感器样机定位焊接温度变化曲线



#### 4.4 外焊罩与传感器样机正式焊接

外焊罩与传感器样机正式焊接时,测点 1、3、 4、5、15、16的温度随时间变化曲线见图 12。可以 看到:焊接过程中,各测点都有一定的温升,最高温 度均在 61 ℃以下,最大温升不超过 25 ℃;由于焊 接完成后没有进行长时间通风散热,所以测点温度 未大幅度下降;安装在印制板上的测点 15、16 的温 升相对较小,温度变化曲线更为平滑,温升比较连 续,与传感器法兰上测点温度最大相差 15 ℃,最高 温度较外焊罩与贮箱法兰模拟件焊接时低 6 ℃。





Fig. 12 Temperature variations of measurement points during formal welding between external welding cover and sensor prototype

## 5 结论

本文提出一种用于运载火箭推进剂贮箱箱底

传感器及阀门管路的密封外焊罩结构,对传感器及 阀门管路与贮箱箱底法兰密封面实现备保密封。并 针对箱底传感器对于外焊罩焊接热效应承受能力 较低的风险,开展了外焊罩焊接热效应摸底实验, 获得以下结论:

 1)分段焊接及焊接间隔中利用低压气源通风 散热的焊接工艺能够有效控制传感器的温升。外焊 罩焊接过程中,传感器上所有测点最高温度为
 60.83 ℃,远低于传感器热敏感元件所能承受的 的最高温度(120 ℃)要求,不会对传感器电器元件 的正常工作造成影响。

2)焊接时间越短、散热时间越长,焊接件的温 升越小。因此,适当增加正式焊接前定位焊接点数 量,可以有效地缩短每段焊接时间,从而降低焊接 热影响区温度。

3)距离焊接区越远,焊接热效应影响越小。因此,适当将敏感元器件远离焊接热影响区,在敏感 元件与焊接区之间增加绝热或隔热组件,均能有效 隔绝热传导,降低元器件温度。

本研究实验所选用的焊接工艺参数及焊接方 法可为同类型箱底传感器外焊罩焊接提供依据,为 后续涉及电子元器件的焊接工序提供技术支撑及 质量保障。

#### 参考文献(References)

- [1] 刘岩,张瑜.推进剂液位传感器长期贮存及性能试验系 统的研制[J].清洗世界, 2020, 36(8): 42-45
   LIU Y, ZHANG Y. Study on the long-term storage and performance test system of propellant level sensor[J]. Cleaning World, 2020, 36(8): 42-45
- [2] 青勤,夏本立,丛继信,等.基于模糊理论的航天发射场 火箭煤油贮存泄漏风险研究[J].火箭推进,2009,35(5):
   60-66

QING Q, XIA B L, CONG J X, et al. Study on the leaking risk of rocket kerosene stored on launching site based on fuzzy theory[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2009, 35(5): 60-66

[3] 侯瑞琴. 航天靶场液体推进剂的泄漏研究与污染控制[J]. 安全与环境学报, 2002, 2(5): 39-41

HOU R Q. Leakage study and pollution control for liquid propellant in space launch set[J]. Journal of Safety and Environment, 2002, 2(5): 39-41

[4] 白少先,李栋,樊世超.真空环境下高温气体静密封界面

泄漏特性分析[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(5): 422-427 BAI S X, LI D, FAN S C. Leakage characteristics of thermal interface of hydrostatic gas seal in vacuum environment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(5): 422-427

- [5] 马建伟,李腾龙,叶涛,等. 深低温服役的阀门导向副变 形超差补偿方法[J]. 宇航总体技术, 2022, 6(2): 64-70
  MA J W, LI T L, YE T, et al. Compensation method for over-deformation of guiding pairs in cryogenic valve[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2022, 6(2): 64-70
- [6] 王莉娜, 史纪军, 李征, 等. 长服役期橡胶密封性能分析 与寿命评估[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(5): 475-481
  WANG L N, SHI J J, LI Z, et al. Performance analysis and lifetime evaluation of rubber seal for long term service[J].
  Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(5): 475-481
- [7] 徐倩,宋漪萍,周鑫,等.基于金属密封垫圈非线性变形 仿真的预紧设计[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(4): 446-450

XU Q, SONG Y P, ZHOU X, et al. Design of tightening

torque based on nonlinear deformation simulation of metallic seal ring[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2017, 34(4): 446-450

- [8] 廖传军,王道连,王洪锐,等. 典型异型金属密封的特点 及应用[J]. 低温工程, 2014, 4: 55-60 LIAO C J, WANG D L, WANG H R, et al. Features and applications of typical non-conventional type metal seals[J]. Cryogenics, 2014, 4: 55-60
- [9] 陈章兰, 叶家伟. 焊接热效应对结构动力学性能影响的 非线性分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 79-82
  CHEN Z L, YE J W. Non-linear influence of welding thermal effect on dynamic performance of structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4): 79-82
- [10] 罗怡, 刘金合, 叶宏, 等. 镁合金真空电子束深熔焊接及 焊缝成形数值模拟[J]. 焊接学报, 2010, 31(6): 65-68 LUO Y, LIU J H, YE H, et al. Numerical simulation on electron beam deep penetration welding and weld appearance of magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(6): 65-68

(编辑:冯露漪)