

管路加热带安装工艺试验研究

邓婉 朱尚龙 林宏 周文勇

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

文 摘 针对推进剂管路加热带缠绕工艺流程复杂、工艺参数不定量的问题开展试验研究,结合工程实践经验,采用试验矩阵方法研究获取绝缘膜包覆状态、涂胶厚度以及气泡对加热效果的影响。结果表明,内绝缘膜无交叠缠绕、外绝缘膜间隙缠绕、利用专用刮胶板控制涂胶厚度约0.2 mm等工艺方法可以减少气泡的产生,有效提升加热带对管路的加热效果,满足产品质量要求,该试验结论可为后续管路加热带缠绕及其他加热片安装提供参考。

关键词 加热带,加热效果,安装工艺,试验研究

中图分类号:TK124

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.015

Experimental Study on the Installation Process of Electric Heater for Pipeline

DENG Wan ZHU Shanglong LIN Hong ZHOU Wenyong

(Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076)

Abstract Due to the complexity and non-quantitative process of installation procedure of electric heater for propellant-line, test matrix method according to engineering experience was implemented to determine the influence of the status of insulation flim, glue thickness and embedded air bubble on pipeline heating. This study indicates that by choosing non-overlap wrapping for inner/outer insulation flim and 0.2 mm glue thickness using special rubber scraper, it is useful to reduce air bubble formation and improve the heating quality. The test results may serve as a reference for future installation of similar pipelines with electric heater.

Key words Electric heater, Heating effect, Installation process, Test study

0 引言

航天器热控技术一般可分为主动和被动两类,其中电加热是目前最常用的主动热控技术^[1],电加热器根据形状不同可分为加热片和加热带两种类型,主要用于动力系统发动机、贮箱或管路。例如,卫星发动机上粘贴加热片、发动机附近管路安装加热带^[2];大小两型上面级热控系统均采用以被动热控为主、主动电加热为辅的方案,其中,多层包覆电加热主要用于推进剂液体管路^[3];上面级泵压式发动机针对温度偏低的管路及推力室扩张段采取多层包覆主动电加热的控温措施^[4-6];远征三号上面级挤压式发动机热控采用电加热器进行温度补偿控制,同时表面进行隔热包覆^[7];推进分系统气瓶和贮箱外表面粘贴薄膜型加热片包覆多层隔热组件,液体管路缠绕加热带并包扎10个单元的多层隔热组件^[8-9]。

管路加热带是航天器热控系统的重要组成部分,但其安装工艺较为复杂,要求较高,操作难度大,实施

不合格容易导致在轨飞行时加热带对管路加热效果不好,严重时导致动力系统不能正常工作,甚至影响任务成败。国内外对加热带具体缠绕工艺介绍较少,DAVID等^[10]提及了推进剂管路加热带及安装两种方式,李联成等^[2]分析了管路加热带安装工艺及难点。本文基于管路加热带安装工艺参数开展试验研究,针对具体环节提出质量控制方法,有效提升加热带对管路的加热效果,使得管路温度满足控温要求,确保航天器动力系统可靠运行,解决工程实际应用。

1 加热带安装

1.1 安装方式

管路安装用的加热带^[2]是一种由加热带绝缘材料(聚酰亚胺薄膜)、电热材料(加热丝)、加热带引线组成的薄膜型加热带,采用室温硫化硅橡胶GD414进行粘贴。国外推进剂管路的加热带及实施有两种方式^[10],如图1所示,一种为带状加热带,采用螺旋形缠绕在管路上;另一种为片状加热带,直接按圆形的方式包覆在

收稿日期:2021-10-13

第一作者简介:邓婉,1986年出生,高级工程师,主要从事航天器热控设计研究工作。E-mail:wana.an042272@163.com

管路上。由于管路空间走向较为复杂,为方便操作,国内管路加热带安装主要采用螺旋形缠绕方式。

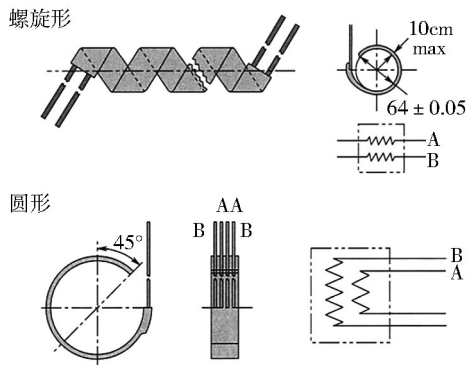


图1 推进剂管路加热带及安装方式

Fig. 1 Propellant-line heater and installation method

1.2 安装流程

管路加热带安装流程如图2所示。

(1)加热带外观检查:加热带外观应平整、无皱折,绝缘层无损坏、无翘裂。

(2)加热带阻值测量:测量记录加热带的回路阻值和绝缘阻值。

(3)安装面清洁:用蘸有酒精的白绸布对加热带和管路安装表面进行清洁,擦去油污等多余物。

(4)工艺带预安装:使用工艺带对管路进行预安装,尽量保持缠绕间隙均匀。

(5)内绝缘膜粘贴:采用聚酰亚胺胶带沿管路无间隙紧密缠绕一层。

(6)GD414涂抹:在加热带和管路表面内绝缘膜上均匀地涂覆室温硫化硅橡胶GD414。

(7)加热带缠绕粘贴:将加热带均匀紧密缠绕在管路上。

(8)加热带阻值再测量:再次测量记录加热带的回路阻值和绝缘阻值。

(9)常温固化:加热带缠绕粘贴完成后常温固化24 h。

(10)外绝缘膜粘贴:在已缠好的加热带上再绕一层聚酰亚胺胶带。

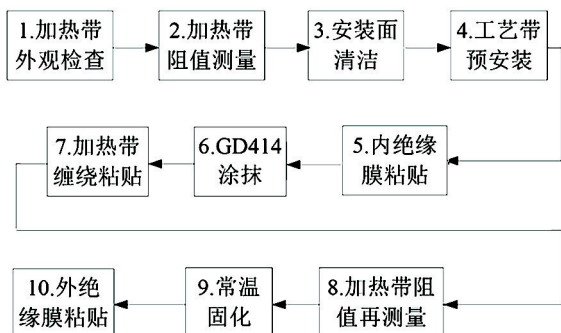


图2 加热带安装流程

Fig. 2 Installation procedure of heater

1.3 安装难点

根据加热带在管路安装的工艺过程,并结合实际操作,存在以下困难和疑惑:

(1)为了确保加热带与管路之间绝缘,内绝缘膜沿管路紧密缠绕粘贴,实施时容易交叠,也容易产生气泡;

(2)加热带和管路表面内绝缘膜上涂抹GD414时,胶的厚度不好控制,为了确保加热带与管路牢固安装,往往涂胶较厚;

(3)加热带沿管路螺旋形缠绕,安装过程中易产生气泡;

(4)涂胶过厚和气泡的存在对加热效果是否影响显著;

(5)为便于加热带缠绕过程中气泡泄出,外绝缘膜间隙缠绕是否有利于提升加热效果。

1.4 理论分析

为了探索管路加热带缠绕过程中气泡产生和涂胶厚度对加热效果影响,开展理论分析。缠绕加热带的管路换热如图3所示。

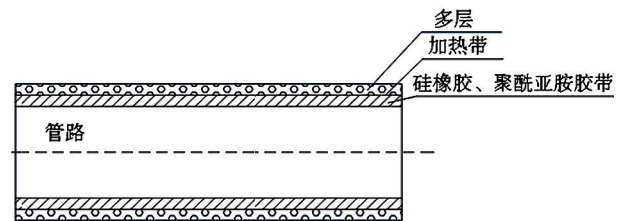


图3 管路换热示意图

Fig. 3 Schematic diagram of heat exchange around pipeline

由于多层具有良好的保温隔热作用,不考虑加热带通过多层与空间进行热交换的传热量,则管路上缠绕加热带的加热功率 Q 可表示为:

$$Q = 2\pi\bar{\lambda}l \frac{T_2 - T_1}{\ln(r_2/r_1)} \quad (1)$$

式中, $\bar{\lambda}$ 是材料平均热导率, l 是管路长度, T_1 是管路表面温度, T_2 是加热带表面温度, r_1 是管路外径, r_2 是管路采用硅橡胶粘贴加热带后的外径。

忽略聚酰亚胺薄膜的厚度, r_2 可表示如下:

$$r_2 = r_1 + \delta \quad (2)$$

式中, δ 是涂胶厚度。

对式(1)中 $\ln(r_2/r_1)$ 进行泰勒展开,当 $\delta/r_1 \ll 1$ 时, Q 可近似为:

$$Q \approx 2\pi\bar{\lambda}l \frac{T_2 - T_1}{\delta} r_1 = \bar{\lambda}A \frac{T_2 - T_1}{\delta} \quad (3)$$

式中, A 是加热带与管路的接触面积。

进一步得到管路表面温度 T_1 为:

$$T_1 = T_2 - \frac{Q\delta}{\bar{\lambda}A} \quad (4)$$

根据式(4)可知,当 Q 一定时, T_1 与 δ 、 A 和 $\bar{\lambda}$ 有关。直观上说,如果加热带缠绕过程中产生气泡,表征为 $\bar{\lambda}$ 或 A 变小,则 T_1 变小;如果涂胶厚度过厚,即 δ 变大,则 T_1 变小。

2 试验方案

针对管路加热带安装工艺存在的难点,同时,进一步验证气泡存在和涂胶厚度对加热效果的影响,采用试验矩阵方法开展真空热试验。试验实施方案先选定一组加热带缠绕工艺参数(表1的A1→B1→C1→D1→E1)为基线,每次改变一种工艺参数进行缠绕,共6根管路,具体见表2,改变的工艺参数为灰色底纹单元格。

表1 试验实施方案参数设置
Tab. 1 Parameter settings of test scheme

因素	水平	
	1	2
A 内绝缘膜交叠情况	不交叠	1/4 交叠
B 加热带涂硅橡胶厚度	较薄一层	较厚一层
C 管路涂硅橡胶厚度	较薄一层	较厚一层
D 加热带缠绕后气泡量	无气泡	有气泡
E 外绝缘膜包覆情况	全面包覆	间隙包覆

表2 加热带缠绕方案参数设置

Tab. 2 Parameter settings of heater installation

管路序号	加热带安装工艺顺序 ¹⁾	管路序号	加热带安装工艺顺序 ¹⁾
case1	A1→B1→C1→D1→E1	case4	A1→B1→C2→D1→E1
case2	A2→B1→C1→D1→E1	case5	A1→B1→C1→D2→E1
case3	A1→B2→C1→D1→E1	case6	A2→B1→C1→D1→E2

注:1)基线工艺流程。

加热带控温阈值设置为11~14℃,定义升温时间为管路温度从控温下限上升到控温上限所需时间。用升温时间作为加热带加热效果的评价参数,在相同加热功率前提下,升温时间越短,加热效果越好,反之亦然。试验件在空间模拟室内放置如图4所示,为确保加热效果,缠绕加热带管路的外表面包覆多层隔热组件。

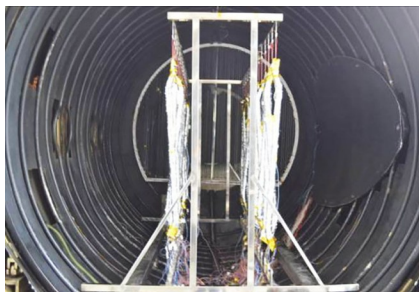


图4 试验件在空间模拟室的放置状态

Fig. 4 State of pipeline being placed in the vacuum tank

3 结果及分析

3.1 内绝缘膜交叠与否加热效果比较

内绝缘膜缠绕分为无交叠(case1)和1/4交叠(case2)

两种状态(图5),对加热效果的影响如图6所示。结果表明:内绝缘膜缠绕交叠与否,加热带均可对管路按控温阈值进行加热,其中,内绝缘膜1/4交叠时升温时间随着时间推移而变长,是无交叠时升温时间的1.2~3倍,即内绝缘膜无交叠的加热效果更佳,且1/4交叠的加热效果随时间推移愈发下降。其原因是绝缘膜存在一定厚度(尽管很小),交叠处不可避免地存在一定间隙(内部存在气体,即肉眼不可见的气泡),由于胶带宽度一定,无交叠时,气体较容易从搭接处缝隙进行压力释放;而交叠量较大时,气体两侧的胶带均有较强的粘接力,进入真空后气体可能通过粘附薄弱点进行压力释放,由于存在压力差可能导致胶带与管路局部脱开,使得加热带对管路的加热效果变差。

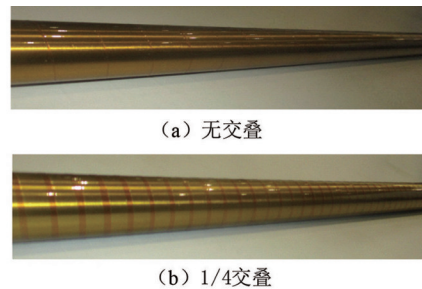


图5 内绝缘膜包覆状态

Fig. 5 Wrapping status of interior film

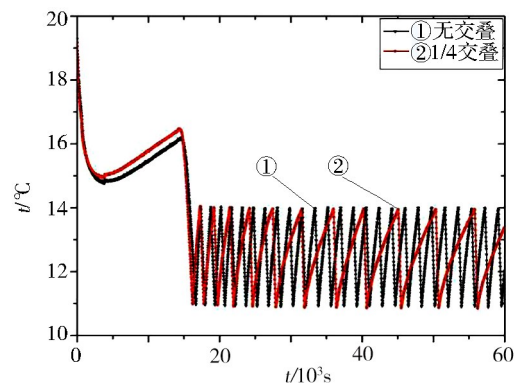


图6 内绝缘膜包覆对加热效果影响

Fig. 6 Effect of interior insulation film on pipeline heating

3.2 涂胶厚度对加热效果的影响

在加热带和管路表面内绝缘膜上涂覆GD414胶时,胶的厚度不好控制,可能存在加热带涂胶较厚(case3)或管路涂胶较厚(case4);通过采用专用刮胶板对加热带和管路涂胶,使得两者表面胶覆盖率100%,且涂胶厚度控制在肉眼可见管路表面内绝缘膜底色和加热带底色(厚度约0.2mm),如图7所示。涂胶厚度过厚的加热带完成缠绕粘贴后虽经目视检查未产生气泡,放置一段时间后可发现加热带内表面局部区域出现封闭的气泡(图8),即涂胶过厚容易导致气泡二次产生。

两种涂胶较厚状态分别对比基线工艺流程(case1)的加热效果影响结果如图9所示。结果表

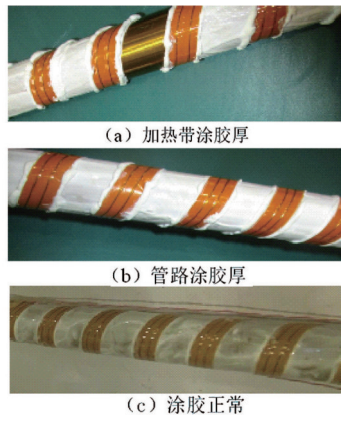


图7 涂胶状态

Fig. 7 Status of glue

明:涂胶厚度正常与否,加热带均可对管路按控温阈值进行加热,其中,涂胶较厚两种状态的升温时间均随着时间推移而变长,加热带涂胶较厚的升温时间是涂胶较薄时的1.2~3.5倍,管路涂胶较厚的升温时

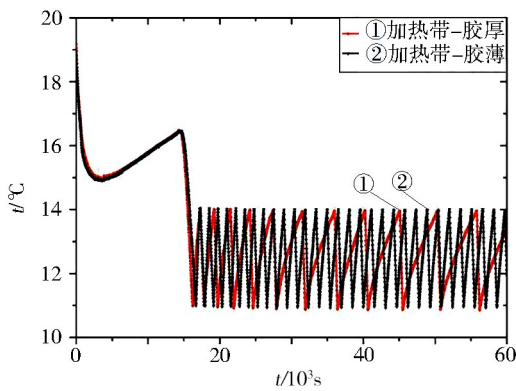


图9 涂胶厚度对加热效果的影响

Fig. 9 Effect of glue thickness on pipeline heating

3.3 气泡对加热效果的影响

加热带安装流程中内绝缘膜粘贴、加热带缠绕粘贴和外绝缘膜粘贴步骤容易产生气泡(图10),涂胶过厚也易导致气泡的二次产生。有气泡状态的加热带(case5)对比基线流程(case1)的加热效果影响结果如图11所示。结果表明:无气泡的加热带可以对管路按控温阈值进行加热;有气泡状态的加热带无法对管路正常加热,管路温度持续下降。原因是气泡在真空环境进行压力释放,可能使得内绝缘膜或和加热带与管

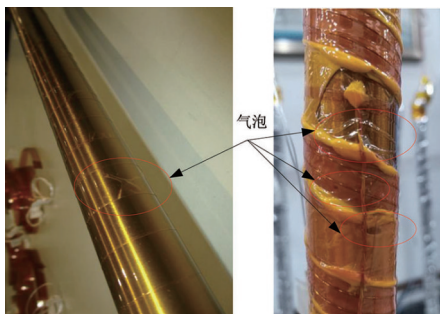


图10 有气泡状态的加热带

Fig. 10 Existing air bubble in heater

间是涂胶较薄时的1.2~4.5倍,即涂胶较薄的加热效果更佳,且涂胶较厚的加热效果随时间推移愈发下降。这是由于加热带或管路涂胶过厚增大了加热带与管路之间的接触热阻,且易导致局部区域气泡二次产生,影响加热带对管路的加热效果。

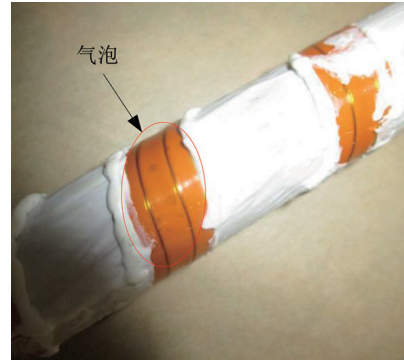


图8 涂胶过厚导致气泡二次产生

Fig. 8 Excessive glue results in the reproduction of air bubble

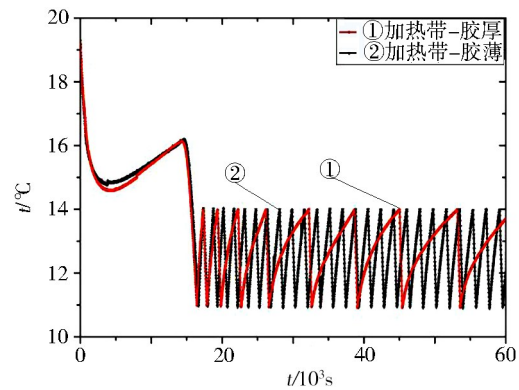
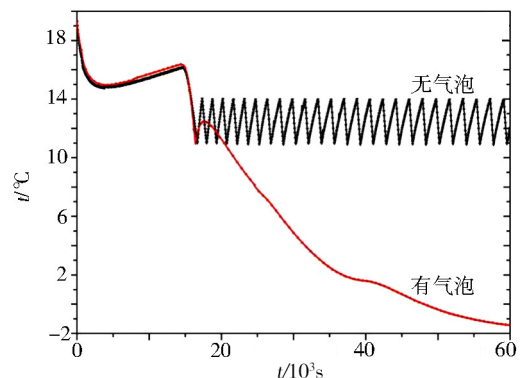


图11 气泡对加热效果的影响

Fig. 11 Effect air bubble on pipeline heating

路脱开,造成加热带局部悬空而导致无法对管路正常加热。同时,大气环境下气泡的导热而造成地面测试时加热带加热效果正常而飞行试验时加热效果不佳。



3.4 外绝缘膜间隙与否加热效果比较

外绝缘膜缠绕有全面包覆(case1)和间隙包覆(case6)两种状态(图12),对加热效果的影响见图13。结果表明:外绝缘膜缠绕全面包覆与否,加热带均可对

管路按控温阈值进行加热,其中,外绝缘膜间隙包覆时升温时间是全面包覆的0.8倍,即外绝缘膜间隙包覆的加热效果更佳。其原因与内绝缘膜交叠与否对加热效果影响类似,外绝缘膜间隙包覆有利于内部封闭气体有效排出,使得加热效果提升。

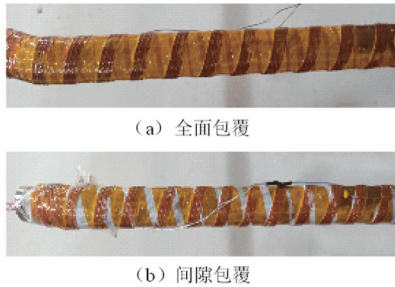


图12 外绝缘膜包覆状态

Fig. 12 Wrapping status of exterior insulation film

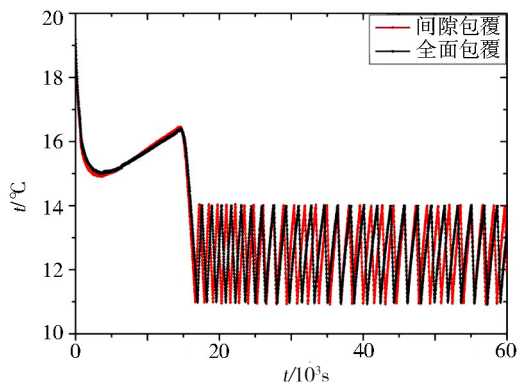


图13 外绝缘膜包覆对加热效果的影响

Fig. 13 Effect of exterior insulation film on pipeline heating

4 结论

根据航天器管路加热带安装工艺过程中的操作难点,采用试验矩阵方法开展真空热试验研究,得到以下结论:

(1)内绝缘膜无交叠缠绕和外绝缘膜间隙缠绕,均有利于加热带内部封闭气体有效排出,减少气泡产生,可以提升加热效果;

(2)加热带或管路涂胶过厚一方面增大了加热带与管路之间的接触热阻,另一方面容易导致局部区域气泡二次产生,使得加热带对管路的加热效果变差,因此,需要严格控制涂胶厚度在肉眼可见管路表面绝缘膜底色和加热带底色(厚度约0.2 mm);

(3)加热带安装过程中产生的气泡以及涂胶过厚导致的二次气泡,在真空环境下进行压力释放,使得加热带与管路脱开,造成局部悬空,影响加热带对管路加热效果,严重时导致加不上热,管路温度呈持续下降现象,这也是地面测试时加热带加热效果正常而在轨飞行时加热效果不佳的原因。因此,加热带安装过程中应尽量减少气泡产生,如有气泡需扎泡处理。

参考文献

[1] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术[M]. 北京:中

国科学技术出版社, 2008:419-442.

HOU ZENGQI, HU JINGLING. Spacecraft thermal control technique-theory and application [M]. Beijing: The Science Technique Press, 2008:419-442.

[2] 李联成, 张萍. 卫星管路加热带安装工艺方法探讨[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(4):384-386.

LI L C, ZHANG P. Installation of pipeline with electric heater in spacecraft [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(4):384-386.

[3] 陈益, 叶成敏, 林宏, 等. 基于成熟型谱产品的上面级系统集成研制探索与实践[J]. 航天工业管理, 2017(5):41-44.

CHEN Yi, YE Chengmin, LIN Hong, et al. Research and practice of upper stage system integration based on mature spectrum products[J]. Space Industry Management, 2017(5):41-44.

[4] 赵晓慧, 单磊, 蒲光荣, 等. 基于热仿真的泵压式多次起动发动机热控设计[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(2):53-58.

ZHAO X H, SHAN L, PU G R, et al. The thermal design based on numerical simulation of the thermal control of turbopump-fed multi-start rocket engine [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2017, 1(2):53-58.

[5] 周佑君, 叶成敏. 远征上面级研制技术发展[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(6):9-15.

ZHOU Y J, YE C M. The Development and progress of Yuanzheng upper stage technology [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(6):9-15.

[6] 肖立明, 李欣, 侍野, 等. 长时间在轨上面级动力系统关键技术研究[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(6):23-28.

XIAO L M, LI X, SHI Y, et al. Research on the key technology of the upper stage propulsion system for long-duration space mission [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(6):23-28.

[7] 陈明亮, 刘昌国, 徐辉, 等. 远征三号上面级轨控发动机研制及在轨验证[J]. 火箭推进, 2020, 3(46):11-18.

CHEN M L, LIU CH G, XU H, et al. Development and in-orbit verification of orbit-control engine in YZ-3 upper stage [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 3(46):11-18.

[8] 彭芝生. 双组元推进分系统主要部件的热控设计[C]//第五届空间热物理会议, 北京, 2000:786-91.

PENG Zhisheng. Thermal control design of main components of two-component propulsion subsystem [C]//Fifth Conference on Space Thermophysics, Beijing, 2000:786-91.

[9] 周砚耕, 周秀娟, 张彧, 等. 一种卫星推进分系统热控的优化设计方法[J]. 空间科学学报, 2017, 37(6):748-751.

ZHOU Y G, ZHOU X J, ZHANG Y, et al. An optimization design method for thermal control of satellite propulsion [J]. Chin. J. Space Sic., 2017, 37(6):748-751.

[10] GILMORE D G. Spacecraft thermal control handbook Volume I: Fundamental technologies (second edition) [M]. The Aerospace Press El Segundo, California, 2002:238