

舱外航天服热试验外热流模拟方法研究

孙萌, 张堪, 姜军, 潘唯
(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 出舱行走所必需的舱外航天服具有复杂外表面形状, 其空间外热流极其复杂。文章对舱外航天服在热试验中所采用的外热流模拟方法进行了对比分析研究, 结合航天服的特点对热试验中外热流模拟的方式进行了探讨, 论证了用接触式电加热片及红外加热笼两种外热流施加方式的可行性, 并通过分析的手段对不同热试验方法中施加的热流和太空中的热流大小及分布进行了对比。

关键词: 舱外航天服; 热平衡试验; 外热流

中图分类号: V416.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2009)02-0134-03

1 前言

舱外航天服的研制是“神舟七号”飞船研制的重要组成部分。对于登月计划及空间站来说, 舱外航天服的热设计是否合理, 能否保障航天员工作在合适的环境温度下, 都需要进行热试验验证。同时, 评估外热流大小对航天服的内部影响以及评估外热流模拟的准确性对试验的影响也是非常重要的。

2 外热流模拟方式

目前我国所采用的舱外航天服呈半软半硬状态, 除了胳膊和腿部为软材料(多层隔热组件)制造外, 其余部分全部为金属材料。系统整体呈拟人形态, 外表面状态复杂, 为半硬式结构, 整个系统为外部被动热防护、内部主动热控设计。

参照轨道情况, “神舟七号”舱外航天服的空间外热流分布极为复杂, 包括了太阳辐射、地球红外辐射、地球反照及飞船的红外辐射热流 4 个部分, 另外航天服自身各部位之间的相互遮挡也很严重。

目前航天器所采用的外热流模拟方式主要有 4 种, 即太阳模拟器、红外灯阵、红外加热笼、接触式电加热片。下面结合定性分析及热仿真模型分析 4 种热模拟方式的优缺点。

2.1 太阳模拟器

太阳模拟器在直接模拟太阳外热流方面具有精度高、模拟方式简单的特点。但舱外服的外热流

不只包括太阳辐射, 还包括地球红外辐射、地球反照以及飞船的红外辐射, 其中飞船的红外辐射在红外极端高温工况下占总外热流的 34%, 其比例也非常大。因此要完整模拟舱外航天服的所有外热流, 不能单单依靠太阳模拟器, 增加过多边界模拟条件会增大试验的难度及模拟的复杂性, 所以太阳模拟器不适合直接用于模拟舱外服的外热流。

2.2 红外灯阵

对于舱外航天服来说, 各部位外形复杂, 对灯阵的角系数各不相同, 而且红外灯阵除了红外以外还有一部分可见光谱。另外, 红外灯阵为平板设计, 不宜于外表面的各种材料对各波段光谱的吸收率及发射率也不易测量。模拟航天服来自各个方向的热流。

2.3 红外加热笼

红外笼为单一光谱的热源, 且可以做成舱外航天服包络面的形式, 一方面较易于热分析仿真, 另一方面对于热试验来说, 可以用与航天服相同外表面编制成的绝热型热流计来进行测量。红外笼的缺点除了制作、测量、标定的试验工作量及热仿真分析工作量较大以外, 还由于其工作方式的限制, 每个分区的热流值都是固定的。

2.4 接触式电加热片

电加热片是最容易实施且工作量较小的一种模拟方式, 外热流模拟比较准确, 但粘贴加热片难

收稿日期: 2008-10-21; 修回日期: 2008-10-31

作者简介: 孙萌(1977-), 男, 硕士学位, 工程师, 主要从事航天器热控设计工作。Email: sunmeng501@163.com。

免会对舱外航天服的外表面状态产生一定的影响，且外表面的形状复杂，能粘贴加热片的区域有限，因此必须考虑热流密度均匀性对舱外航天服内部的影响。

3 热流均匀性的影响

由上节可知，红外笼及加热片模拟外热流都是可行的，但是无论是加热片还是红外笼都无法实现全方位的覆盖，因此热流均匀性的影响都是必须考虑的。如图 1 所示，取航天服腰部建立有限元模型，其中红外笼距壳体 10 mm。

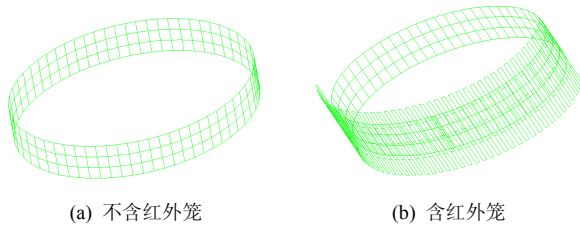


图1 舱外航天服腰部有限元模型

Fig. 1 The FEM model for waist part of space suit

图 2 分别为太阳正照+X 向、用红外笼模拟、加热片平均加到受照面上、加热片平均加到 80%受照面上、加热片平均加到 60%受照面上、加热片平均加到 40%受照面上 6 种情况下的热流分布。

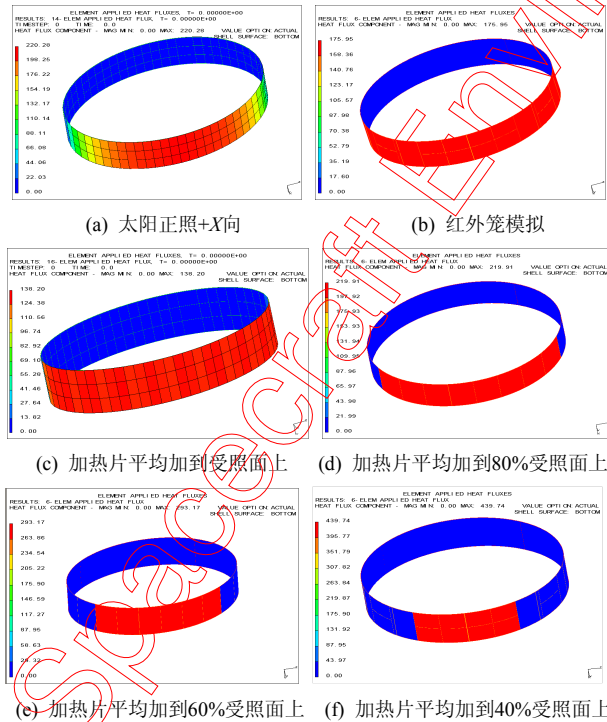


图2 舱外航天服腰部有限元模型不同情况下的热流分布
Fig. 2 The heat flux distribution of FEM model for waist part of space suit

图 3 为以上 6 种热流分布所对应的内部壳体的温度分布，具体数值见表 1。

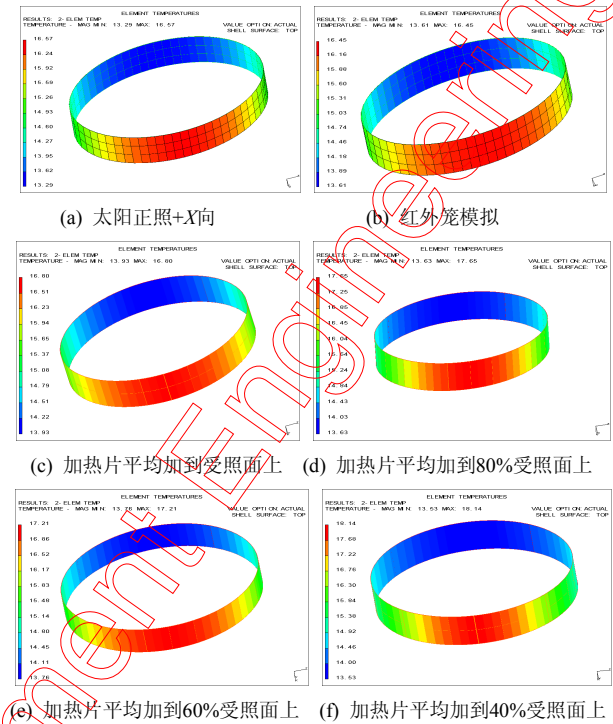


图3 舱外航天服腰部有限元模型不同情况下的温度分布
Fig. 3 The temperature distribution of FEM model for waist part of space suit

表1 舱外航天服腰部有限元模型不同情况下的温度
Table 1 The temperature of FEM model for waist part of space suit

	外热流大小 /W	壳体最高 温度/℃	壳体最低 温度/℃
太阳正照+X向	11.0	16.57	13.29
红外笼模拟	11.3	16.45	13.61
加热片平均加到受照面上	11.0	16.80	13.93
加热片平均加到80%受照面上	11.0	17.21	13.76
加热片平均加到60%受照面上	11.0	17.65	13.63
加热片平均加到40%受照面上	11.0	18.14	13.53

以上数值模拟是在不考虑舱外航天服内部对流换热的基础上进行的，实际情况下服装内部是充气 40 kPa 的，如果考虑内部对流换热，其温度均匀性要比以上数值模拟结果更好。综上，加热片平均加在受照面上及红外笼模拟外热流较为准确。虽然加热片可以很准确地模拟出真实的外热流大小，但是加热片模拟难免要破坏舱外航天服的外表面状态，而且舱外航天服的外表面状态

复杂,可以粘贴加热片的区域有限,如头盔部位是无法用加热片进行模拟的。虽然红外笼模拟外热流有一定的误差,但其误差大小是可以接受的,同时可以通过数值模拟结合试验测量的方式进行控制。

4 红外笼模拟舱外服外热流可行性研究

红外笼外形为圆柱体表面去掉底面,高2300mm,顶面直径1250mm,如图4所示。



图4 红外笼模型

Fig. 4 The FEM model for infrared cage

下面采用数值模拟的方法,比较特定工况(航天员面对太阳,背面离飞船一定距离)下,红外笼模拟舱外航天服外热流与实际空间外热流的差异。图5为舱外航天服吸收的各个方向的热流密度的分布图(左侧为实际空间外热流,右侧为红外笼模拟的外热流)。

表2为舱外航天服部分部位的外热流以及外

热流总和。表中左右下肢偏差较大的原因是舱外航天服底部没有用红外笼进行外热流模拟,可以通过脚底粘贴加热片的方式进行补偿;其他地方的外热流模拟很接近真实值,另外由图5外热流分布对比来看,也是非常接近的。因此用红外笼模拟舱外航天服的外热流是可行的。



(a) 实际空间外热流

(b) 红外笼模拟外热流

图5 红外笼模拟外热流与实际对比

Fig. 5 The comparison between real space heat flux with the simulated heat flux

表2 舱外航天服部分部位的外热流以及外热流总和

Table 2 The heat flux in different parts of space suit

部 位	右下肢	左下肢	上背包	下背包	腰臀	上身	右臂	左臂	头盔	总和
实际空间外热流/W	59.1	58.9	133.3	65.7	53.3	70.8	55.8	54.9	27.6	585.9
红外笼模拟外热流/W	53.8	54.1	130.5	69.1	57.0	69.3	53.8	52.6	27.6	574.7
偏差/%	9.0	8.1	2.1	5.2	6.9	2.1	3.6	4.2	0.0	1.9

5 结论

本文结合舱外航天服的特点,评估了热流均匀性对舱外航天服内部温度分布的影响,并对舱外航天服的热试验中所采用的外热流模拟方法进行了对比分析研究,说明采用红外笼模拟舱外航天服的空间外热流是合理的;并通过分析的手段对热试验和太空中的热流大小及分布进行了对比,说明采

用红外笼模拟舱外航天服空间外热流的方式是可行的。

参考文献 (References)

- [1] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [2] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术——原理及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007