

文章编号:1000-8055(2012)11-2505-06

金星气球环境分析与热动力研究

雷岩鹏, 杨春信

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 分析了金星独特的大气环境, 归纳了影响金星气球飞行的主要环境因素, 并建立了数学模型. 依据金星气球的投放、飘浮程序, 设计了金星原型氦气球, 设计驻留高度为 35 km. 建立了金星气球热动力仿真平台. 计算结果表明: 金星气球在 30~40 km 高度释放, 可快速到达驻留高度并作长期飘浮; 金星气球系统的温度范围为 440~520 K, 最大速度低于 10 m/s. 这为进一步开展对金星气球的研究提供了依据.

关 键 词: 金星气球; 大气环境; 飞行高度; 热动力; 温度

中图分类号: V273

文献标志码: A

Study of environment analysis and thermodynamic on Venus balloon

LEI Yan-peng, YANG Chun-xin

(School of Aeronautics Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The Venus atmospheric environment was described with mathematical model. The Venus balloon thermodynamic model was established. Then, the floating process of a helium prototype balloon, of which the floating altitude was designed as 35 km, was numerically designed by this model. The results show that when the Venus balloon is released at the altitude between 30 km and 40 km, it can reach floating altitude quickly and keep long-term floating, the balloon system should endure the temperature between 440 K and 520 K, its instantaneous maximum speed is less than 10 m/s. This research would provide basis for the further development of Venus balloon further development.

Key words: Venus balloon; atmosphere; fly altitude; thermodynamic; temperature

金星(Venus)在中国又名启明、太白、长庚. 金星位于地球靠近太阳的一侧, 是除月球外距离地球最近的天体. 金星与地球大小、构造类似, 都具有坚硬的地壳和稠密的大气, 被称为姊妹星.

1961 年, 苏联发射了“金星 1 号”探测器. 此后, 苏、美、欧洲各国和日本对金星开展了几十次持续不断的探测活动^[1-4]. 历史上, 金星是各国深空探测活动的第一站.

金星大气稠密, 伴有频繁强烈的闪电. 火山活动剧烈, 云层含有大量酸性物质. 地表大气压力约为 95 个标准地球大气压, 温度可达 750 K^[3]. 因

此, 着陆器难以在地表环境工作.

金星中低层大气环境类似地球平流层大气环境, 适宜气球飞行. 1985 年, 苏联-法国联合的 Vega/Venera 项目, 成功使用金星气球在 5 km 高度飘浮了 2 个地球日^[2]. 截至目前, 这是仅有一次在外星球使用浮空器.

目前, 美国的喷气动力试验室^[5-6]正在开展第二代金星气球的相关研究. 国内马云鹏、武哲等^[7]建立了地球高空气球辅助设计平台; 姚伟、李勇等^[8]建立了地球平流层飞艇的热动力模型; 方贤德、王伟志等^[9]探讨了地球平流层飞艇的热动力

收稿日期: 2011-11-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121115.1028.016.html>

作者简介: 雷岩鹏(1982—), 男, 湖北武汉人, 博士生, 主要从事临近空间飞行器研究.

特性. 目前, 国内有关金星气球的研究报道还很少.

本文针对在金星中低空大气使用的气球, 分析了金星独特的大气环境, 归纳了影响金星气球飞行的主要环境因素, 并建立模型; 描述了金星气球从与载入飞行器分离到驻留高度飘浮的过程; 设计了金星氦气原型气球; 建立了金星气球的热动力模型. 假设金星气球从低于设计驻留高度释放, 计算了气球的高度、速度和温度等主要热动力参数.

1 金星环境

金星自转昼夜周期为 117 个地球日, 可近似认为对日朝向静止. 因此, 对于慢速运动的气球, 忽略昼夜交替带来的环境参数变化.

金星表面 85% 的区域被火山喷发的物质覆盖. 火山喷发出的硫与大气中的水结合, 在 50 km 高度形成橙色硫酸云^[4]. 高空大气环流剧烈, 风速达 100 m/s, 平均 4 个地球日可环绕金星一周^[2].

1.1 金星大气热辐射环境

金星大气稠密, 中低空大气清澈. CO₂ 的含量占大气总质量的 85% 以上^[10], 强烈吸收太阳直接辐射. 因此, 金星气球的辐射热源主要为大气散射和高温地表的长波辐射, 如图 1 所示.

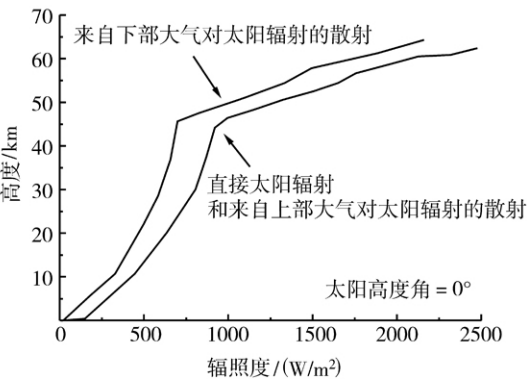


图 1 金星低空大气^[10]

Fig. 1 Venus lower atmosphere^[10]

为便于金星气球的热设计, 规定地表至 45 km 高度云层为星表-大气系统. 气球接收来自环境的热辐射划分为上下 2 部分, 如图 1 所示, 分别将其拟合为数学公式.

太阳辐射和来自上部大气的散射的热量 Q_{down} 为

$$Q_{\text{down}} = 161 + 29.49 \times 10^{-3} z - 0.27 \times 10^{-5} z^2$$

(1)

式中 z 为海拔高度, m.

来自下部大气的散射和地表的热辐射的热量 Q_{up} 为

$$Q_{\text{up}} = 35.68 + 26.23 \times 10^{-3} z - 0.26 \times 10^{-5} z^2$$

(2)

1.2 金星中低空大气参数

如图 2 所示, 金星低空 (0~70 km) 大气温度随高度近似线性变化. 低空大气温度 T_a 近似拟合为

$$T_a = 730 - 7.246 \times 10^{-3} z \quad (z < 70 \text{ km})$$

(3)

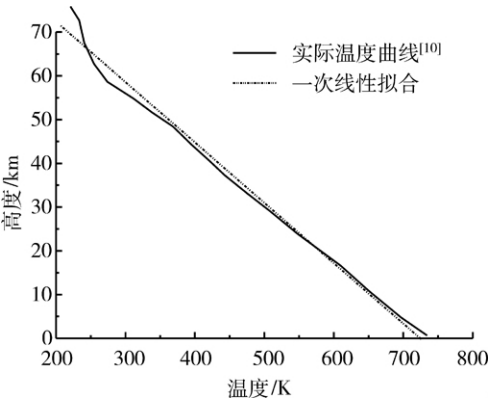


图 2 金星大气温度

Fig. 2 Venus atmospheric temperature

金星中低空大气压力 p_a 随高度变化的拟合公式为

$$p_a = \exp(17.6 - 0.1258 \times 10^{-3} z)$$

(4)

公式 (4) 在 40~60 km 高度范围 (气球活动区域) 与实际数据 (图 3 中实线), 拟合良好.

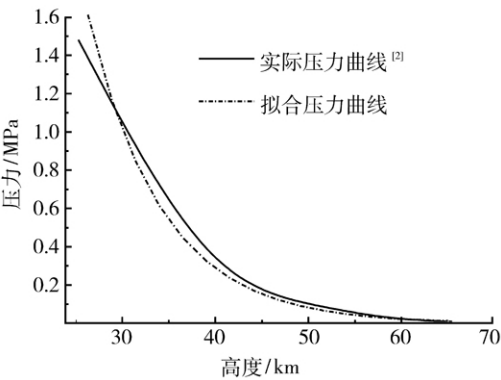


图 3 金星大气压力

Fig. 3 Venus atmosphere pressures

1.3 金星大气 (CO₂) 的热物性

金星大气 96.5% 的成分为 CO₂. 由于缺乏金星大气实测数据, 本文用 CO₂ 的热物性替代金星

大气热物性.

由于气体在 10~1000 kPa 压力下的黏度、导热系数等热物性仅为温度的函数,其热力性质与理想气体特性符合良好^[11]. 本文根据文献[11]中的数据,分别将其拟合为温度的函数.

金星大气(CO₂)的黏度 μ_a 为

$$\mu_a = (2.4 + 0.042T_a) \times 10^{-5}$$

(250 K < T_a < 500 K)

(5)

金星大气(CO₂)导热系数 κ_a 为

$$\kappa_a = (-6.84 + 0.0778T_a) \times 10^{-3}$$

(250 K < T_a < 500 K)

(6)

2 金星气球

金星气球由奔向金星的空间飞行器携带. 飞行器进入环绕金星的轨道后,择机分离载入器,进入金星大气. 如图 4 所示,载入器的载入区域为金星的夜间半球且朝向地球,可以避免太阳辐射,同时保持星地联络畅通.

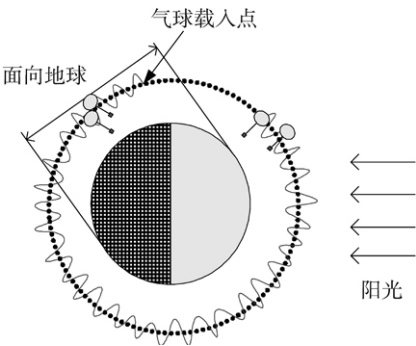


图 4 金星气球载入、飘浮示意图

Fig. 4 Venus balloon entry and flying process

如图 5 所示,载入器携带气球进入金星大气后,打开减速伞,气球系统开始充气. 气球充气完毕后与载入器分离,开始机动飞行,最终飘浮在设计驻留高度.

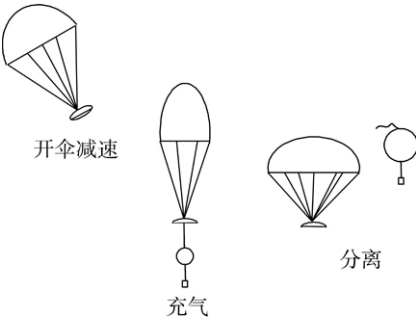


图 5 金星气球的释放程序

Fig. 5 Floating process of Venus balloon

本文设计金星气球驻留高度为 35 km(夜间驻留高度略低),可以避开了硫酸云层,且处于高空环流风场,便于扩大气球观测范围. 金星原型气球的质量分配见表 1.

表 1 金星气球质量分配

Table 1 Mass distribution of Venus balloon system

	气球系统 m_{tot}	蒙皮 m_f	浮升气体 m_{He}
质量/kg	110	10	9

本文设计的气球为零压气球,在不同的高度,其体积分别为

1) 当气球飘浮在设计驻留高度时,囊体完全膨胀,其体积 V^* 为

$$V^* = \frac{m_{\text{He}}}{\rho_a^*}$$

(7)

式中 m_{He} 为气球内部氦气质量; ρ_a^* 为 35 km 高度大气的密度,取 0.544 kg/m³; 则金星原型气球的最大体积 $V^* = 6.54 \text{ m}^3$.

2) 当气球高度低于 35 km 时,气球自由膨胀,向上飘浮. 根据理想气体状态方程,气球的内部浮升气体(氦气)

$$p_{\text{He}} M_{\text{He}} V = m_{\text{He}} R_{\text{He}} T_{\text{He}}$$

(8)

式中 p_{He} 为氦气的压力,由于气球没有完全膨胀,氦气压力等于环境大气压力; M_{He} 为氦气相对分子质量; V 为气球囊体体积; R_{He} 为氦气理想气体常数; T_{He} 为氦气的温度.

3) 同理,当气球高度大于 35 km 时,气球完全膨胀. 气球向下运动,直到设计驻留高度.

3 金星气球热动力模型

Kreith 和 Kreider 于 1974 年建立了地球高空气球动力模型,Carlson 和 Horn 于 1983 年建立了针对地球零压气球的热动力模型^[12]. 此后,有关气球热动力模型的研究均以此为基础.

3.1 金星气球的动力方程

根据阿基米德原理,气球的浮升力 F_{buy} 为

$$F_{\text{buy}} = \rho_a V g_{\text{Venus}}$$

(9)

式中 g_{Venus} 为金星引力常数,取 8.82 N · m²/kg².

气球系统所受的重力为

$$F_g = m_{\text{tot}} g_{\text{Venus}}$$

(10)

物体浸没在流体中,由于流体的黏性力,当物体相对流体运动时会受到附加质量 F_m 的作用. 附加质量的大小与流体类型、物体体积有关,用附加质量系数 C_m 来描述

$$F_m = C_m \rho_a V \frac{d^2 z}{dt^2} \tag{11}$$

式中 $\frac{dz}{dt}$ 为气球在垂直方向上的速度.

气球与大气相对运动产生空气阻力 F_{drag} 为

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho_a C_d \left| \frac{dz}{dt} \right| \frac{dz}{dt} A \tag{12}$$

式中 C_d 为空气阻力系数. A 为气球的迎风面积, $A = \pi \bar{R}^2$. $\bar{R}$ 为气球的平均半径.

综上,如图 6(a),取竖直向上为坐标系正方向,金星气球的动力方程为

$$(m_{tot} + C_m \rho_a V) \frac{d^2 z}{dt^2} = (\rho_a V - m_{tot}) g_{Venus} - \frac{1}{2} C_d \left| \frac{dz}{dt} \right| \frac{dz}{dt} A \tag{13}$$

式中 C_m 为虚拟质量系数; t 为时间.

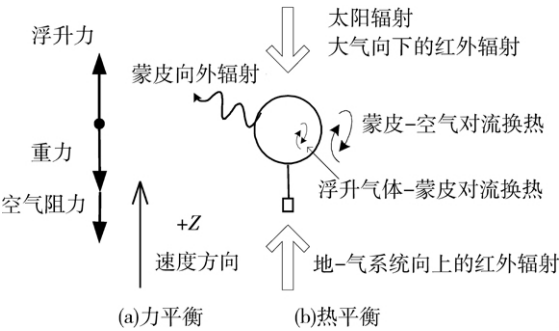


图 6 金星气球热动力示意图

Fig. 6 Venus balloon dynamic schematic

3.2 金星气球内部的换热

与常规地球气球不同,金星气球为防止酸性气体腐蚀,蒙皮涂覆金属耐酸层.因此,金星气球蒙皮不透明,气球内部的浮升气体不能直接与外部环境直接进行辐射换热.

气球内部氦气与蒙皮换热的换热形式为球形内部空间的自然对流,其换热量 Q_{int} 为

$$Q_{int} = h_{int} (T_f - T_{He}) S \tag{14}$$

式中 T_f 为蒙皮温度; S 为气球内表面积,取 $S = 4\pi \bar{R}^2$; h_{int} 为气球内部氦气与蒙皮的自然表面传热系数

$$h_{int} = Nu_{int} \frac{\kappa_{He}}{L} \tag{15}$$

式中 κ_{He} 为氦气的导热系数; L 是气球内部空间的特征尺寸,取 $L = 2\bar{R}$.

由文献[12],气球内部氦气的 Nusselt 数为

$$Nu_{int} = 2 + 0.6 (Gr_{He} Pr_{He})^{0.25} \tag{16}$$

根据热力学第一定律,氦气的内能变化等于气体与外界的换热量减去对外的做功,因此

$$m_{He} C_{He} \frac{dT_{He}}{dt} = h_{int} (T_f - T_{He}) S - \frac{M_a m_{He} T_{He} g_{Venus}}{T_a M_{He}} \frac{dz}{dt} \tag{17}$$

式中 C_{He} 为氦气的比热容; M_a 是空气的相对分子质量.

3.3 金星气球蒙皮的热平衡方程

如图 6(b),蒙皮外表面吸收环境热辐射,同时与空气进行对流换热.蒙皮内表面与氦气进行自然对流换热.

公式(18)为蒙皮的热平衡方程.等式右边第一项为蒙皮内表面与氦气的自然对流换热,第二项为蒙皮外表面与环境大气的对流换热,第三项为气球吸收来自外部的热辐射,第四项为气球表面向外辐射的热量.

$$m_f C_f \frac{dT_f}{dt} = h_{int} (T_f - T_{He}) S + h_{ext} (T_a - T_f) S + \alpha_f (Q_{down} + Q_{up}) A - \epsilon_f \sigma (T_f^4 - T_{bb}^4) S \tag{18}$$

式中 C_f 为蒙皮的热容; Q_{down} 和 Q_{up} 分别见公式(1)和公式(2); α_f 为蒙皮的吸收率,本文设计的蒙皮表面涂覆耐酸的金属薄膜. h_{ext} 为蒙皮与空气的强迫表面传热系数. σ 为斯忒潘-波尔兹曼常数. ϵ_f 为蒙皮在红外波段的发射率. T_{bb} 为大气环境的背景温度.

蒙皮-空气的强迫表面传热系数 h_{ext} 为

$$h_{ext} = Nu_{ext} \frac{\kappa_a}{L} \tag{19}$$

在金星 35 km 高度大气中,当气球速度为 10 m/s 时,计算 $Re \approx 10^7$. 由文献[12]知

$$Nu_{ext} = 0.56 Re^{0.6} \tag{20}$$

($Re > 250\,000$)

3.4 金星气球热动力仿真平台

本文建立的金星气球热动力仿真平台主要由大气环境模型、气球参数、设计驻留指标和热动力模型等 4 个模块构成,如图 7 所示.该平台根据金星大气环境特征和气球探测任务,选择气球构型及主要设计参数,并给出高空驻留指标.然后输入各项设定参数.通过金星气球热动力模型(联立上文建立的各方程求解),可以得到气球的瞬时热动力参数.

针对金星低空大气环境,本文建立的金星气球热动力模型主要有以下假设:

- 1) 浮升气体(氦气)为理想气体;

2) 忽略气球漏气;

- 3) 气球外形始终为球体;
- 4) 忽略吊舱和绳索等附件对换热的影响;
- 5) 蒙皮、浮升气体的温度分布均匀.
- 运动轨迹和温度变化. 同时,该模型还存在以下局限待后续改进.

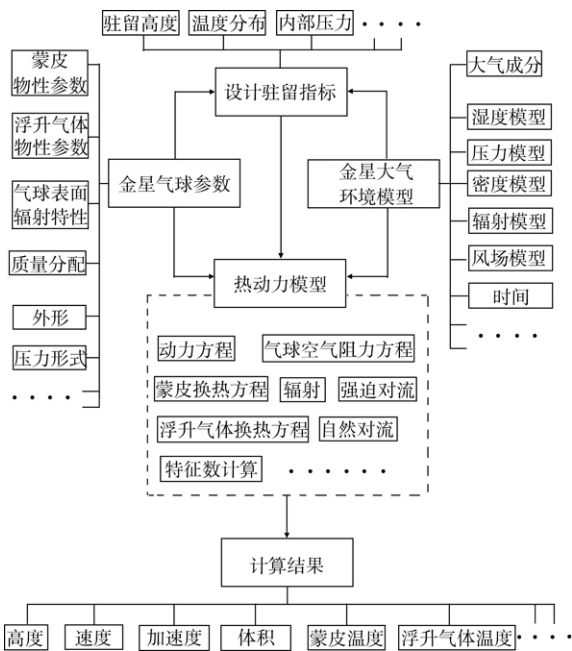


图 7 金星气球热动力仿真平台

Fig. 7 Thermodynamic simulation platform for Venus balloon

4 结果与讨论

设定金星气球与载入器在 30 km 高度分离, 通过本文建立的仿真平台, 得到气球后续飞行过程的热动力参数, 如图 8 所示.

气球以 1 m/s 的初始速度分离后, 开始加速浮升, 直至到达气球设计驻留高度, 气球速度开始震荡逐渐变小.

当气球向上运动时, 蒙皮一方面吸收来自大气和地表的辐射热量, 另一方面与环境冷空气进行对流换热, 并且向外辐射热量. 同时, 蒙皮与气球内部氦气进行自然对流换热. 结果表明: 与内部浮升气体温度的变化速率比较, 蒙皮温度变化较快. 此时, 强迫对流换热为蒙皮与环境冷空气的主要换热方式.

当气球到达设计驻留高后, 蒙皮-大气的换热量与蒙皮吸收的环境热辐射相平衡, 蒙皮温度逐渐等于驻留高度大气的温度.

由于金星气球蒙皮不透明, 气球内部的浮升气体只能将热量传递给蒙皮, 然后耗散到环境大气中, 直到浮升气体温度、蒙皮温度与大气温度相等. 本文建立的热动力模型能够描述金星气球的

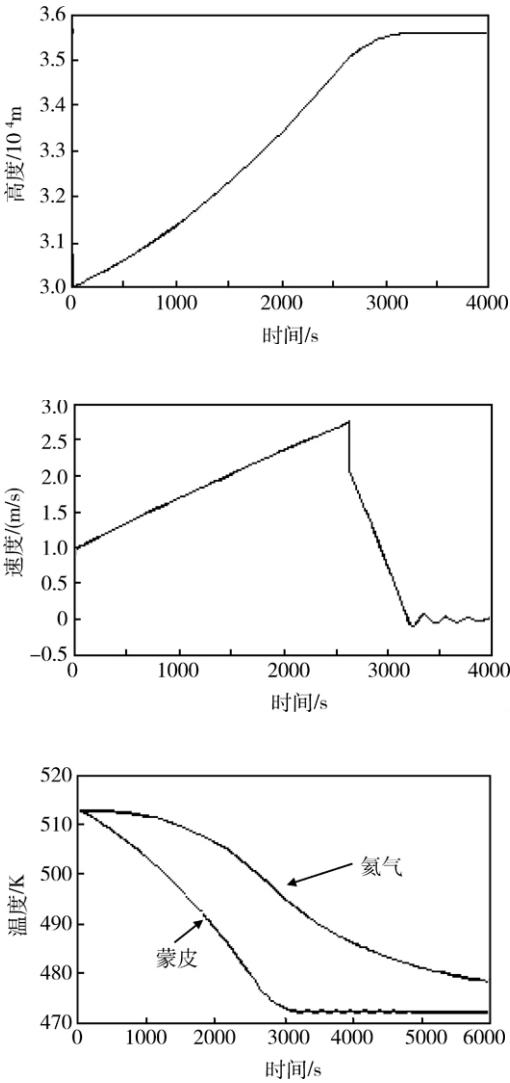


图 8 金星气球热动力仿真结果

Fig. 8 Thermodynamic simulation results of Venus balloon

- 1) 金星环境模型仅适用于昼半球, 没有风场模型, 不能预测气球的三维运动.
- 2) 环境模型中使用的部分空气物性参数不是实际金星大气的数据.
- 3) 蒙皮和内部气体的温度分布并不是均匀的, 将影响气球系统的换热效果.
- 4) 气球在上升过程中, 囊体上半部膨胀程度大于下半部. 因此, 同等速度下, 气球受到的空气阻力大于本文的计算.
- 5) 当气球接近驻留高度开始震荡飘浮时, 气球的速度接近 0, 此时对流换热的计算应该采用相应的自然对流换热公式.

5 结 论

本文针在金星大气环境中飞行的气球热动力特征,建立了金星大气环境模型和金星气球热动力仿真平台,可以预测金星气球的蒙皮与浮升气体的温度、气球速度和垂直平面的飞行轨迹.

通过对金星原型气球的热动力仿真得出:

- 1) 设计驻留高度为 35 km 时,适宜金星气球飞行.
- 2) 在 30 km 高度,以 1 m/s 的初始速度投放金星气球,可快速到达驻留高度并作长期漂浮.
- 3) 金星气球被投放后,在上升过程中的瞬时最大速度不超过 10 m/s.
- 4) 金星气球系统的温度在 440~520 K.

通过调整输入参数,本文建立的仿真平台还可以得到其他类型金星气球的热动力参数,包括不同的气球结构、材料或飞行策略. 这为金星气球的详细设计、制定飞行(试验)策略等相关研究提供了参考.

参考文献:

[1] Landis G. Low altitude exploration of the Venus atmosphere by balloon[R]. AIAA-2010-628777,2010.

[2] Sagdeev R Z. An overview of the Soviet vega balloon experiment and studies of the atmosphere of Venus[R]. Washington,D. C. : NASA center for aerospace information (CASI),1986.

[3] Van den Berg M L,Falkner P,Atzei A C,et al. Venus entry probe technology reference study[J]. Advances in Space Research,2006,8(11):2626-2632.

[4] Titov D V,Svedhem H,Koschny D,et al. Venus express

science planning[J]. Planetary and Space Science,2006,54 (13/14):1279-1297.

[5] Hall J L,Kerzhanovich V V,Yavrouian A H,et al. Second generation prototype design and testing for a high altitude Venus balloon[J]. Advances in Space Research,2009,44 (1):93-105.

[6] Hall J L,Fairbrother D,Kerzhanovich V V,et al. Prototype design and testing of a Venus long duration,high altitude balloon[J]. Advances in Space Research,2008,42 (10):1648-1655.

[7] 马云鹏,武哲,吕明云,等. 高空气球综合/开放式设计系统[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(1):61-64.

MA Yunpeng,WU Zhe,LÜ Mingyun,et al. High-altitude balloon integration/opening design system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2010, 36(1):61-64. (in Chinese)

[8] 姚伟,李勇,王文隽,等. 平流层飞艇热力学模型和上升过程仿真分析[J]. 宇航学报,2007,28(3):603-607.

YAO Wei,LI Yong,WANG Wenjun,et al. Thermodynamic model and numerical simulation of a stratospheric sirship take-off process[J]. Journal of Astronautics,2007,28(3): 603-607. (in Chinese)

[9] 方贤德,王伟志,李小建. 平流层飞艇热仿真初步探讨[J]. 航天返回与遥感,2007,28(2):5-9.

FANG Xiande,WANG Weizhi,LI Xiaojian. A study of thermal simulation of stratospheric airships[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing,2007,28(2):5-9. (in Chinese)

[10] Bachelder K N M H,Hall J,Jones J,et al. Venus geoscience aerobot study (VEGAS)[R]. AIAA-99-3856,1999.

[11] 丁国良. 制冷空调新工质:热物理性质的计算方法与实用图表[M]. 上海:上海交通大学出版社,2003.

[12] Carlson L A,Horn W J. New thermal and trajectory model for high-altitude balloons[J]. Journal of Aircraft,1983,20 (6):500-507.