

# 相变蓄热材料在高超声速飞行器热控系统中的应用

王佩广<sup>1</sup>, 刘永绩<sup>2</sup>, 王浚<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083; 2. 成都飞机设计研究所, 成都 610064)

**[摘要]** 就高超声速飞行器防热与热控问题,从“相变蓄热材料充当辅助冷源”思路出发,结合不同飞行器的飞行特点,提出了5种热控系统方案,即空气循环热控方案、蒸发循环热控方案、液体冷却回路方案、开式蒸发冷却热控方案、直接式相变蓄热冷却方案;指出了选择合适相变蓄热材料及相变蓄热封装设计是其中的关键技术,并结合航空航天领域相关技术进行了探讨与分析。

**[关键词]** 相变蓄热材料;热控;高超声速飞行器

**[中图分类号]** V245 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)07-0092-05

## 1 前言

高超声速飞行器在政治、经济及军事方面具有重要的战略意义,是21世纪世界航空航天事业发展的热点。目前世界各主要航天大国都在积极开展与之相关的技术研究。解决“热障”问题是高超声速飞行器研制的关键技术之一<sup>[1,2]</sup>。高超声速飞行器热控系统的主要任务是对内部热载荷进行冷却。与普通飞机不同,高超声速飞行器在飞行过程中将遭受严重的气动加热,无法像普通飞机那样利用冲压空气对飞行器内部的热载荷进行冷却,必须寻找新的替代冷源。目前高超声速飞行器普遍使用低温燃料,如液氢等。低温燃料具有很大的热容量,可以作为冷源使用。然而,低温燃料的流量控制必须以发动机需求为基准,而在特定飞行阶段,如下降阶段,低温燃料的流量无法满足热控系统冷却热载荷的需要,必须采用辅助冷源加以补充。相变蓄热材料具有较大的相变潜热,相变过程中温度变化很小,作为高超声速飞行器辅助冷源使用引起了人们很大的兴趣。短时飞行的无人验证飞行器特点是飞行速度、飞行高度变化快,峰值热流高,总加热量相对较小,因而适合利用相变蓄热材料对瞬时峰值热载荷进行

冷却。

## 2 系统方案比较<sup>[3~6]</sup>

相变热控系统的优点是:相变材料种类繁多,选择范围大;相变过程近似等温变化,易于控制和管理;可针对具体的冷却需要采取不同的封装形式,结构紧凑;系统设计自由度大。

### 2.1 空气循环热控方案

空气循环热控系统主要由压气机、膨胀涡轮、相变材料容器、水分离器等组成,如图1所示。工作介质为空气。空气在压气机内受到压缩后进入相变材料容器,将热量传递给相变材料,再进入膨胀涡轮膨胀降温,经水分离器进入设备舱,吸收热量后再进入压气机,完成一个循环。压气机动力来自发动机或电动机。该方案的优点是结构简单、可靠性高、设备质量小,由于高超声速飞行器对质量大小非常敏感,因此这一优点值得重视;缺点是空气制冷效率低,控制精度差,受高度和速度的影响较大。

### 2.2 蒸发循环热控方案

蒸发循环热控系统由蒸发器、压缩机、相变材料容器、节流阀等组成,如图2所示。液体制冷剂在蒸发器中吸收设备舱热量蒸发,蒸气进入压缩机压缩,

**[收稿日期]** 2007-03-26; **[修回日期]** 2007-05-23

**[作者简介]** 王佩广(1974-),男,山东淄博市人,北京航空航天大学博士研究生

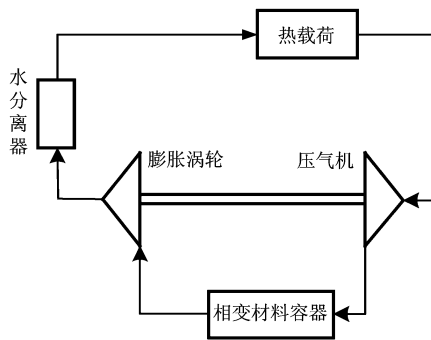


图1 空气循环热控系统原理图

Fig.1 Scheme of air cycle thermal control system

然后进入相变材料容器将热量传递给相变材料,冷却后的制冷剂经节流阀流入蒸发器,再次吸收热量而不断循环。该方案的优点是性能系数较高,经济性好,受飞行高度和速度影响小;缺点是结构比较复杂,制造成本高。

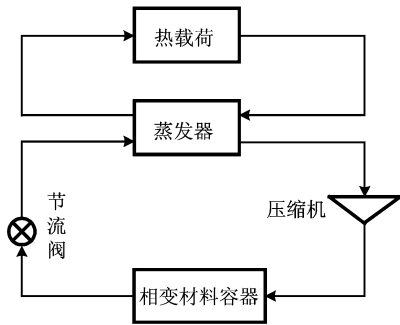


图2 蒸发循环热控系统原理图

Fig.2 Scheme of vapor cycle thermal control system

### 2.3 液体冷却回路方案

液体冷却回路系统由液体回路、换热器、相变材料容器、集液箱及附件组成,如图3所示。冷却液经增压泵升压后经液体循环管路进入设备舱吸收热量,在换热器中将热量传递给低温燃料,最后流回集液箱。当低温燃料流量不能满足冷却需要时,冷却液通过旁路进入相变材料容器将热量传递给相变材料。该方案中相变材料作为辅助冷源使用。其优点是充分利用了低温燃料的热容量,代偿损失小,不受外界环境影响,对短时飞行的无人验证飞行器是一个比较好的选择。

### 2.4 开式蒸发冷却热控方案

开式蒸发冷却系统可分为直接式冷却和间接式冷却。该系统常用的相变材料有液氮、水、干冰等。其优点是制冷量大,可靠性高;缺点是工质不可重复使用,每次飞行前须重新添加。

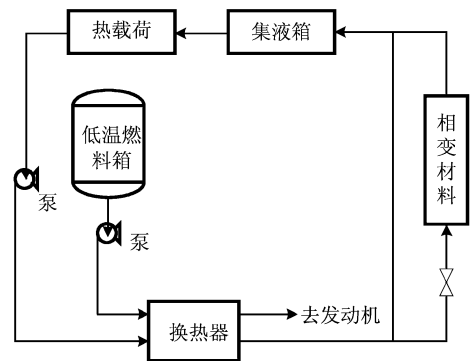


图3 液体冷却回路系统原理图

Fig.3 Scheme of liquid loop thermal control system

图4是一个间接通风式冷却系统,用空气冷却热负荷。空气由风扇驱动,经循环管路到各个设备,吸收热量后进入换热器与液态低温冷却剂换热,冷却剂蒸发后蒸气经排气口排出飞行器。温度传感器装在流速大、温度均匀的空气分配管路内。通过流量控制和限流器限制最大流量,以防在开始冷却时液态冷却剂溢出。加热器只在过冷状态下工作。

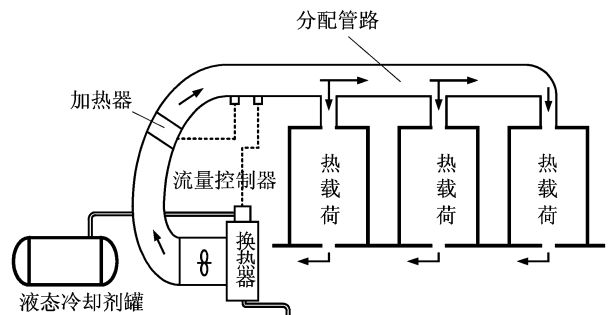


图4 间接式蒸发冷却系统原理图

Fig.4 Scheme of indirect evaporation cooling system

图5是一个直接式蒸发冷却系统图。与间接式蒸发冷却系统不同的是,液态制冷剂由喷嘴直接喷射到舱内,并在风扇驱动下与舱内空气混合,降低舱内环境温度。当舱内压力超出某一要求值时,舱内空气经压力控制活门排出飞行器外。与间接式方案相比,直接式方案更适合于高空高速飞行器,是一种很实用的热控方案。

### 2.5 直接式相变蓄热冷却方案

对于大功率的电子设备,可以直接采用相变材料容器封装电子设备,利用相变潜热吸收电子设备散发的热量,以达到冷却电子设备的目的。这种方案仅适合电子设备功率较大,且飞行时间相对较短的情况,对发热量小,体积相对较大的电子设备并不

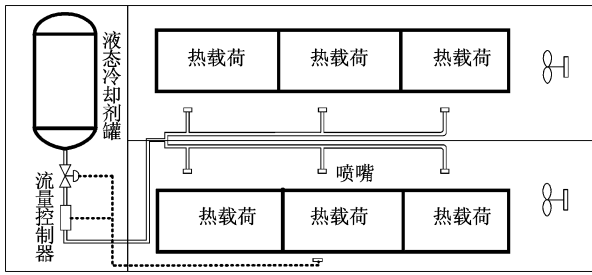


图5 直接式蒸发冷却系统原理图

Fig.5 Scheme of direct evaporation cooling system

经济。这种冷却方案在高速导弹上已广泛应用,而在高超声速飞行器上的应用还有待进一步研究。

### 3 相变材料的选择<sup>[7~10]</sup>

相变材料的热物性主要包括:相变潜热、导热系数、比热容、膨胀系数、相变温度、相变潜热等。根据任务需求,一种合适的相变材料需要有适当的相变温度、较大的相变潜热、较高的导热系数、较小的膨胀系数,并且与封装容器具有较好的相容性。

相变蓄热材料可分为固液、液气、固固和固气等。常用的固液相变材料有无机盐类、有机化合物类及金属等。无机盐类主要是硫酸盐、磷酸盐、碳酸盐等的水合物,其熔点低,熔化潜热大,价格便宜,但是稳定性差,经多次放热吸热循环后会出现固液分离、过冷、老化变质等不利现象。有机类材料主要是某些高级脂肪烃、醇、羧酸及盐类,包括石蜡类、非石蜡类、某些聚合物等。与无机材料相比,其固体成型好,不易发生相分离及过冷,腐蚀性小,缺点是导热性较差。金属类包括铝及碱金属等轻质金属及其合金,该类物质的特点是导热性好,熔化热大,蒸气压力小。由于金属熔点一般较高,这类相变材料通常适合于高温场合。

常用的液气相变蓄热材料有水、液氮、液氧、液氢、液态空气、液氨、液氦等。液气相变材料潜热大,但相变后气体所占的体积较大,因此适合于开放式冷却系统,尤其是对于短时飞行的高超声速验证飞行器,采用开放式蒸发冷却系统是一个经济可靠的方案。部分常用液气相变材料性质如表1所示。

表1 常用液气相变材料性能参数

Table 1 Properties of typical liquid to gas phase change materials(PCMs)

相变材料	标准沸点/K	潜热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	分子量	比热/(kJ·kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
水	373	2 500	1 000	18.02	1.0
液氮	239.75	1 369.7	682	17.03	2.15
液氧	90.17	212.3	1 140	32.0	0.916
液氢	77.35	197.6	810	28.02	1.05
液态空气	78.8	205	873	28.96	1.006
液氨	20.27	445.9	71	2.016	14.3
液氦	4.125	20.2	124.8	4.003	5.275

从表1中可以看出,水相变潜热大,并且易于取得,成本低廉,是一种理想的相变蓄热材料。水蒸发器在国外某些飞机上已经得到成功应用,但很少用于20 km以上的高空环境。因此,对飞行高度超过30 km的高超声速飞行器,在热控系统中应用水蒸发器需要进行严谨的理论分析和地面试验。

### 4 相变材料储量计算

以图3所示液体冷却回路系统为例,按照最严重工况设计,通过以下步骤计算全包线内所需相变材料储量:

1)分别计算飞行器在爬升、巡航和下降(再入返回)阶段的峰值热载荷及累积热载荷;

2)分别计算飞行器在爬升、巡航及下降(再入返回)阶段低温燃料所吸收的热载荷;

3)确定飞行器舱内所能承受的最高热载荷,以确定热控系统的最大热负荷,热控系统最大热负荷与低温燃料所吸收的热载荷的差值即为相变材料需要吸收的热载荷;

4)相变材料热载荷除以选定的相变材料的相变潜热,即可确定相变材料储量。

### 5 相变材料的封装

封装设计的主要问题是封装材料的物理性能、相变材料与封装材料的相容性、封装形式等。根据不同任务需求,封装形式有集总封装及分封装。集

总封装是指相变材料封装于一个有内部换热器的大容器中,传热液体与相变材料通过内部换热器进行热量传递;分封装是将相变材料用多个小容器封装后分别放置在需要冷却的场合。

图6是一种采用集总封装形式的开式水蒸发器,容器内有蛇管换热器,冷却剂在蛇管内流动,与管外的水进行换热,水蒸发后通过排气活门排出飞行器。

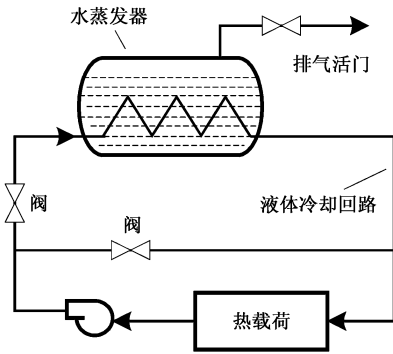


图6 水蒸发器系统示意图

Fig.6 Scheme of water evaporator system

图7是一种采用相变材料的电子设备冷板,封装形式为分封装。在冷板下安装了多个方形小格,内装固液相变材料,如固体石蜡。工作时,小格内封装的相变材料吸收电子设备产生的热量熔化成为液体,熔化过程近似为等温过程,从而保证了电子设备的正常工作。这种封装结构简单灵活,能够有效应对短时大功率工作的电子设备冷却的需要。

## 6 结语

随着相变蓄热技术的不断发展和应用,其在高超声速飞行器热控领域的应用前景十分看好。所提出的一些初步设想,还有很多工作要做,要进一步加强相变蓄热材料的基础理论研究和应用技术研究,以便更好地开展介于航空和航天领域之间的高超声

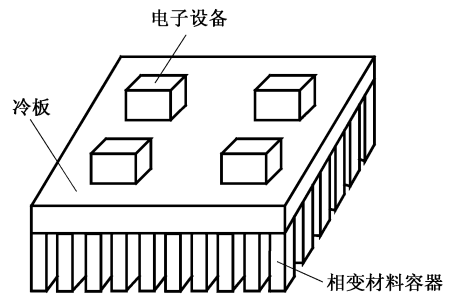


图7 相变材料电子设备冷板

Fig.7 Avionics cooling panel using phase change materials

速飞行器热控技术研究,推动该技术在航空航天领域中的应用。

### 参考文献

- [1] 黄志澄. 高超音速飞行器及其发展趋势分析[J]. 国际航空, 1998,(3):17-20
- [2] 解发瑜,李刚,徐忠昌. 高超声速飞行器概念及发展动态[J]. 飞航导弹,2004,(5):27-31
- [3] 寿荣中,何慧珊. 飞行器环境控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004
- [4] 崔海亭,杨锋. 蓄热技术及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004
- [5] 张寅平,胡汉平,孔祥冬,等. 相变储能——理论和应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1996
- [6] 王佩广,刘永绩,王浚. 高超声速飞行器综合热管理系统方案探讨[J]. 中国工程科学,2007,9(2):44-48
- [7] 戴,唐黎明. 相变储热材料研究进展[J]. 化学世界, 2001,(12):662-665
- [8] Shanmugasundaram V, Brown J R, Yerkes K L. Thermal Management of High Heat-flux Sources Using Phase Change Materials: A Design Optimization Procedure[R]. AIAA 97-2451
- [9] Bear J. Heat Options for a More Electric Aircraft Thermal Management System[R]. SAE 971244
- [10] Burnes R, Lee M J, McManigal J, et al. Thermal Management in Hypersonic Vehicles: Characterization of Phase Change Materials [R]. AIAA 2001-3974

# Application of phase change materials to thermal control systems for hypersonic vehicles

Wang Peiguang<sup>1</sup>, Liu Yongji<sup>2</sup>, Wang Jun<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautic Science and Technology, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Chengdu Research Institute of Aircraft, Chengdu 610064, China)

[Abstract] To solve the problem of thermal barrier is one of the key technologies that restrict the development of hypersonic vehicles. Starting from the point that phase change materials could be used as additional heat sink, five thermal control system concepts using phase change materials are put forward based on characteristic of different vehicles. They are air cycle system, vapor cycle system, liquid loop system, open evaporation cooling system and direct phase change materials heat storage system. The key technologies for the concepts are selection of appropriate phase change materials and encapsulation design of the materials, which are discussed on the background of aeronautics and astronautics.

[Key words] phase change material; thermal control; hypersonic vehicle

---

(上接 183 页)

# Research of mine farmland heavy metal pollution assessment based on synthetic principal component analysis model

Wang Conglu<sup>1</sup>, Wu Chao<sup>2</sup>, Duan Yu<sup>3</sup>

(1. College of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology,

Xiangtan, Hunan 411201, China;

2. School of Resource and Safe Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Hunan Vocational Institute of Technology, Xiangtan, Hunan 411104, China)

[Abstract] Referring to GB5618—1995 about heavy metal pollution, and using statistical analysis SPSS, the major pollutants of mine area farmland heavy metal pollution were identified by variable clustering analysis. Assessment and classification were done to the mine area farmland heavy metal pollution situation by synthetic principal components analysis (PCA). The study result implied that variable clustering analysis is efficient to identify the principal components of mine area farmland heavy metal pollution. Sort and clustering were done to the synthetic principal components scores of soil sample, which is given by synthetic principal components analysis. In this paper, data structure of soil heavy metal contaminations, relationships and pollution level of different soil samples were discovered. The results of mine area farmland heavy metal pollution quality assessed and classified with synthetic component scores reflect the influence of both the major and compound heavy metal pollutants. Identification and assessment results of mine area farmland heavy metal pollution can provide reference and guide to propose control measures of mine area farmland heavy metal pollution and focus on the key treatment region.

[Key words] synthetic principal components analysis model; mine region soils; heavy metal pollution; assessment