

低温液体冷却剂换热特性研究

Study on Heat Transfer Characteristics of Cryogenic Liquid Coolant

杨昌宝/中航工业金城南京机电液压工程研究中心

摘 要:通过建立地面环境下低温液体冷却剂在多孔介质内的流动换热模型,以及对液氮在多孔介质内的换热特性进行的数值模拟研究,表明液氮具有很强的换热效能,它能够大大降低接触面的温度,可以解决某些高热流密度区域的散热问题。

关键词:低温液体冷却剂,多孔介质;数值模拟 Keywords:cryogenic liquid coolant; porous medium; numerical simulation

0 引言

高超声速飞行器通常是指巡航速 度超过5倍声速(5马赫)的飞行器,即每 秒飞行速度超过1700米。它是21世纪世 界航空航天事业发展的一个主要方向, 在未来军事、政治和经济中将发挥重要 的战略作用。

高超声速飞行器以其超高的速度 而著称,但超高速度势必导致飞行器遭 遇极其严重的气动加热环境。由于空气 动力学加热以及自身动力系统所产生 的大量热量,飞行器某些部位和部件温 度会急剧上升而引起严重的"热障"问 题,"热障"问题的出现直接影响飞行器 的正常运行与安全飞行,因此高可靠性 的热管理与热防护系统是高超声速飞 行器必须解决的关键技术。

目前解决高超声速飞行器热问题 均采用一体化设计方法,即将高超声速 气动环境、机体结构、防热系统、热控系 统以及推进系统等耦合在一起的设计 分析方法。飞行器在高超声速飞行时, 气动加热非常严重,飞行器周围的空气 温度高达数千摄氏度,尤其是机头与机 翼前缘端是飞行器表面温度最高的区 域。在综合热管理与热防护一体化设计 过程中,可在机头与机翼前缘端采用冷 却剂直接冷却的方法,把机体结构设计 成夹层式或管道式,让冷却剂在夹层内 或管道内流动,利用冷却剂相变换热大 量吸收热量的基本原理,对该区域进行 有效的冷却。

1 冷却剂换热模型

1.1 物理模型

物理模型剖面结构如图1所示。该 结构由实体(圆锥结构)、多孔介质和外 壳(圆锥结构)三部分组成,其中外壳与 实体之间形成一个流动通道,冷却剂在 通道内运用相变换热大量吸收热量的 基本原理以降低外壳表面温度。

1.2 数学模型

 1) 冷却剂换热的动力学分析 低温液体冷却剂进入含有多孔介 质的流道后,将发生复杂的能量与质量



图1物理模型剖面图

传递过程,而且由于相变的存在使得冷 却剂的流动换热模型更加复杂多变。多 孔介质一般由固体骨架(颗粒)与孔隙组 成,经传热分析可知,多孔介质内部换 热包括固体骨架(颗粒)之间相互接触及 孔隙中流体的导热过程,孔隙中流体的 对流换热和固体骨架(颗粒)间的辐射 换热(在此忽略)。多孔介质与外壳的换 热包括流体的对流换热以及与固体骨 架(颗粒)的导热。冷却剂在多孔介质流 道内发生相变换热,可认为流道分为两 个换热区域,一个液气共存的两相区和 一个讨热蒸气区。两相区与讨热蒸气区 之间的界面是随时间不断变化的,即过 热蒸气区的起点(干度等于1)位置直接 取决于干度方程的解。在计算过程中需 要跟踪移动的界面(下文中均称为相界 面),通过判断相界面的位置进而模拟 冷却剂的流动过程,再通过数值计算求 解外壳温度分布以及流体的流动换热 过程。

采用两相均相模型,认为相变过程 中两相区没有严格的气液界面存在,气 态和液态共同存在,流体物性根据干度 来定。蒸气干度、外壳温度、过热蒸气温 度均应是分布参数,传热是不稳定的。





图2 平衡"微元"模型示意图

因此,这些参数均不能简单看作一阶环 节或带延迟的一阶环节^[1]。经以上分析, 设法把换热对象划分为足够小的"微 元",在"微元"内以集中参数代替分布 参数,然后把适合"微元"的微分方程推 广到整个流动过程。本文采用节点网络 法进行计算,平衡"微元"模型示意图如 图2所示,并做四个假设:

a. 多孔介质属于刚性介质,均匀且 各向同性。

b. 固体骨架与流体工质处于局部 热平衡。

c. 外壳周向各项参数相同,径向也 没有温度梯度,只在轴向存在分布。

d. 在两相区,两相间处于热力学平 衡,液相与气相充分均匀混合。

2) 动力学方程组的建立[1-3]

a. 质量守恒方程:

$$A\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_f V_f A) = 0$$

式中 ρ_f 为流体的密度(kg/m³); V_f 为 流体的运动速度(m/s);A为截面积(m²)

b. 动量守恒方程:

$$\rho_f A \frac{\partial V_f}{\partial t} + \rho_f V_f A \frac{\partial V_f}{\partial x} = -A \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_f g A \cos \beta$$
$$+ (\mu_f \frac{\partial^2 V_f}{\partial x^2} + \frac{\mu_f}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\partial V_f}{\partial x})) A - \frac{\mu_f \varphi}{K} V_f A$$

式中 μ_f 为流体的动力黏度(Pa·s); φ

为孔隙率;K为渗透率

c. 能量守恒方程:

在模型简化的基础上,可以认 为每一个多孔介质"微元"是由一 部分的固体骨架(颗粒)与一部分的 流体工质组成。无论是两相区还是 过热蒸气区,划分的多孔介质"微 元"不仅与相邻多孔介质"微元"之 间存在热交换,还与外壳"微元"发 生热交换,具体的能量传递如图3 所示。能量守恒方程由两个方程构 成一组方程,即多孔介质"微元"能 量平衡方程与外壳"微元"能量平衡方 程,这两个方程相互关联、相互影响,需 要联合求解。

多孔介质"微元"能量平衡方程: $\frac{\partial}{\partial t} [(\varphi \rho_{f} E + (1 - \varphi) \rho_{s} H_{s}) A] dx$ $+ \frac{\partial}{\partial x} (\varphi \rho_{f} E V_{f} A) dx + \varphi \rho_{f} V_{f} A \frac{\partial (gZ)}{\partial x} dx$ $= \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{eff} A \frac{\partial T}{\partial x}) dx - \frac{\partial}{\partial x} (A \varphi \cdot p V_{f}) dx + Q_{n}$ 式中H为比焓(kJ/kg);下标f、s分别

表示流体、固体骨架。

$$E = \frac{1}{2} V_f^2 + H_f - p/\rho_f ;$$

$$Q_n = (\varphi h + (1 - \varphi) \lambda / \delta) A ;$$

$$\lambda_{eff} = \varphi \lambda_f + (1 - \varphi) \lambda_s ;$$

外壳"微元"能量平衡方程:

 $\rho_{w}C_{w}V\frac{dT}{dt} = -Q_{n} + Q + Q_{near}$ 式中 Q_{n} 同上; $Q = M_{e}\alpha_{e}S + hS\Delta T - \varepsilon S\sigma T^{4}(t)$, M_{e} 为地球辐射出射度, α_{e} 为红外吸收率;

$$Q_{near} = \lambda_s A \frac{\Delta T}{\delta}$$



图3 "微元"能量传递示意图

2 计算结果与分析

2.1 物性及结构参数的选取

外壳选用铝材料,冷却剂选用液 氮,主要参数如表1所示:

表1	参数表
201	2 20 20

参数	数值	参数	数值
锥长	1.0m	半锥角	10°
流道宽度	0.006m	外壳厚度	0.001m
室内温度	297.15K	冷却时间	700s
入口压力	2.0atm	外界压力	1.0atm

2.2 外壳表面温度的计算结果与分析

外壳表面温度分布的计算结果如 图4所示。结果表明:

1)外壳表面温度不断下降且靠近 入口处温度下降的速率要明显快于出 口处,但温度下降的幅度明显变小。

2)由于外壳表面不断与空气发生 对流换热且随着表面温度的下降,外壳 与外界空气的平均温差不断增大,外界 与外壳之间的热量传递直接阻碍了外壳 表面温度的下降,严重影响冷却效果。

3)随着冷却时间的推移,相界面移
 动速率逐渐变小,外壳出口附近温度下
 降缓慢,并保持较高的温度值。

2.3 流体换热的计算结果与分析

多孔介质内流体温度分布的计算 结果如图5所示。结果表明:

 1)两相区流体温度几乎保持不 变,进入过热区后流体温度不断上升。

 2)流体的温度变化与外壳换热有 着密切的关系,外壳接收到的外界热量
 不断增加,冷却效果减弱。

 3)随着时间的推移,出口流体温 度不断下降。

冷却到第500秒时多孔介质内流体 压力、速度沿轴向的变化情况如图6所 示。横坐标表示多孔介质内流体沿中心 轴上的点离底部中心点的距离,纵坐标 表示该点的压力和速度。

研究 Research



3 结束语

通过对外壳表面温度与多孔介质 内流体温度分布、流道内液体冷却剂 的气化过程、压力及速度变化过程的分 析,表明低温液体冷却剂在流道内发生 了复杂的传热传质过程,经过相变换热 吸收了大量的热量,大大降低了接触面 的温度,可以满足某些"热障"区域的冷 却需求。

低温液体冷却剂直接冷却具有冷却速度快、换热量大、结构相对简单等特点,尤其对于解决高热流密度区域的冷却问题具有独特的优势。低温冷却剂换热本身存在复杂的相变过程,同时超声速飞行状态还要考虑多个动力学因素,因此高超声速飞行器上冷却剂的换热特性还有待进一步研究。

参考文献

[1] 陈久芝,阙雄才,丁国良. 冷却 热动力学[M].北京:机械工业出版社, 1998.

[2] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引 论[M]. 北京:科学出版社,1995.

[3] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M].第 三版.北京:高等教育出版社,1998.

[4] 陶文铨. 数值传热学[M].第二 版.西安:西安交通大学出版社,2001.

[5] 童景山,等. 流体热物理性质的计算[M].北京:清华大学出版社, 1982.

作者简介

杨昌宝,工程师,主要研究方向为 飞行器环境控制。