



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104776973 A

(43) 申请公布日 2015. 07. 15

(21) 申请号 201510129167. 2

(22) 申请日 2015. 03. 24

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路 15 号

(72) 发明人 仲峰泉 邢云绯 张新宇

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理
事务所 (普通合伙) 11390

代理人 胡剑辉

(51) Int. Cl.

G01M 9/04(2006. 01)

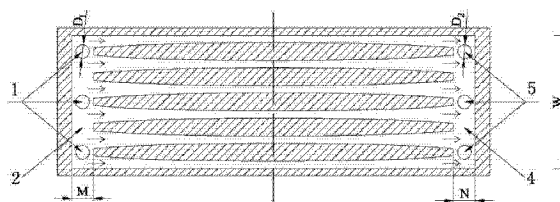
权利要求书1页 说明书4页 附图3页

(54) 发明名称

一种应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置及其构造方法

(57) 摘要

本发明公开了一种应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置，其使得冷却液在热流最高的喉道处具有最大换热性能，并且具有流动无分离、流阻小的优点。其包括冷却液依次流过的进水孔、进口汇流槽、冷却通道、出口汇流槽、出水孔，冷却通道是两个肋之间的空隙或一个肋与冷却装置的壁面之间的空隙，肋的尺寸按照椭圆曲线方程设计。还提供了这种冷却装置的构造方法。



1. 一种应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置,其特征在于:其包括冷却液依次流过的进水孔(1)、进口汇流槽(2)、冷却通道(3)、出口汇流槽(4)、出水孔(5),冷却通道是两个肋(6)之间的空隙或一个肋与冷却装置的壁面(7)之间的空隙,肋的尺寸按照椭圆曲线方程(1)设计:

$$\frac{x^2}{\left(\frac{L}{2\sqrt{1-\frac{H_0^2}{H_1^2}}}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{H_1}{2}\right)^2} = 1 \quad (1)$$

其中 L 是冷却通道总长度, H_1 、 H_0 分别是最大、最小肋宽, x 、 y 分别是肋上任一点的横坐标、纵坐标,原点是肋的中心。

2. 根据权利要求 1 所述的应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置,其特征在于: H_1 、 H_0 通过公式(2)确定

$$P_1 + H_1 = H_0 + P_0 = S \quad (2)$$

其中 P_1 、 P_0 分别是冷却通道的最小、最大宽度, P_1/P_0 取 $1/2-1/5$; S 是相邻两个冷却通道的间距。

3. 根据权利要求 2 所述的应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置,其特征在于:进口汇流槽宽 M 、出口汇流槽宽 N 、槽深 W 、进水孔直径 $D1$ 、出水孔直径 $D2$ 设计时按照通过流速低于 5m/s 。

4. 根据权利要求 3 所述的应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置,其特征在于:在进水孔安装流量控制器与流量计,并且在进水孔、出水孔内安装温度传感器和压力传感器。

5. 根据权利要求 4 所述的应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置,其特征在于:所述温度传感器是热电偶。

6. 一种根据权利要求 1 所述的应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置的构造方法,其特征在于:包括以下步骤:

- (1) 开始;
- (2) 确定高马赫数喷管喉道的热流分布;
- (3) 确定冷却液流量;
- (4) 确定冷却通道的最小、最大宽度 P_1 、 P_0 ;
- (5) 根据公式(1)确定肋上各点的坐标 x 、 y ;
- (6) 确定进口汇流槽宽 M 、出口汇流槽宽 N 、槽深 W 、进水孔直径 $D1$ 、出水孔直径 $D2$;
- (7) 获得喉道的换热系数;
- (8) 获得喉道壁面的温度分布;
- (9) 判断最高壁面温度是否小于安全使用温度,是则执行步骤(10),否则执行步骤(3);
- (10) 判断流阻是否小于预定要求,是则执行步骤(11),否则执行步骤(6);
- (11) 确定该冷却装置的参数。

一种应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置及其构造方法

技术领域

[0001] 本发明属于高超声速推进风洞的技术领域,具体地涉及一种应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置,以及这种冷却装置的构造方法。

背景技术

[0002] 高超声速飞行器及发动机技术的发展极大地依赖于地面风洞设备的建设。其中,能够长时间运行的高超声速推进风洞是研究发动机性能与热防护技术必不可少的设备。高超声速推进风洞的关键部件之一是能够产生高超声速气流的喷管。喷管通过横截面先收缩、后扩张的变化方式对气流进行加速,在出口形成高速气流。因此,喷管喉道(横截面最小处)均具有微小尺寸,如图 1 所示。例如,对于马赫数 6、出口为 $500 \times 500\text{mm}$ 的二维喷管,喉道高度仅为 5.5 毫米。高温、高速气流的冲刷将对喷管喉道产生显著的热载荷。仍以马赫数 6、二维喷管为例,当气流总温为 1650K 、总压 5.5MPa 时,喷管喉道处的热流密度将高达 $13\text{MW}/\text{m}^2$,与宇宙飞船再入大气层的峰值热流接近。在如此高热流条件下,如何保证喷管喉道结构的可靠性一直是长时间运行风洞的设计难点之一。

[0003] 对于高马赫数喷管,常用的冷却方式是在喷管结构中构造圆形或者矩形截面通道,将冷却剂导入通道内,利用对流换热机制吸收管壁热量、降低壁温。例如,日本航空宇宙研究所(JAXA)建造的超声速自由射流试车台(RJTW)包括马赫数 4、6 的二维矩形喷管。喷管采用高压水冷系统,通道由深孔转头沿展向加工,形成圆形冷却通道。美国 Glenn 研究中心建造的马赫数 6 自由射流风洞(HTW),其主喷管也采用了圆形水冷通道结构。国内中科院力学所、中国航天科工集团 31 研究所、国防科学技术大学等单位也先后建造了长时间运行的超声速推进风洞。对于轴对称喷管,冷却通道大多采用了螺旋形式矩形槽;而对于二维、三维矩形喷管,大多采用了沿流向的矩形槽或者沿展向的圆形槽。总之,国内外对于喷管冷却通道一般均采用横截面保持不变的圆形或者矩形(包括方形)通道。采用横截面不变的通道设计可以保证冷却液在通道中的流动与换热参数基本不变,确保冷却效率的均匀性。但是,对于高马赫数喷管,如图 2 所示,其热载荷仅在喉道处极高,而在喉道的上下游热载荷将迅速降低(仅为喉道热流的十分之一甚至几十分之一)。可见,采用圆形或者矩形通道的冷却设计思路将不能充分利用喷管喉道热流分布特点,冷却装置的整体换热效率较低。

[0004] 众所周知,管道湍流换热系数与管道雷诺数的 0.8 方成正比,即在流量一定的前提下,换热系数与通道水力直径的 0.8 成反比。可见,在局部极高热流区域可以通过改变通道截面来提高局部换热系数,从而提高冷却装置的整体换热性能,同时又可以避免冷却液持续高速导致的高流阻损失。因此,变截面设计是冷却高马赫数喷管的一条有效的途径。

发明内容

[0005] 本发明的技术解决问题是:克服现有技术的不足,提供一种应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置,其使得冷却液在热流最高的喉道处具有最大换热性能,并且具有流动无

分离、流阻小的优点。

[0006] 本发明的技术解决方案是：这种应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置，其包括冷却液依次流过的进水孔、进口汇流槽、冷却通道、出口汇流槽、出水孔，冷却通道是两个肋之间的空隙或一个肋与冷却装置的壁面之间的空隙，肋的尺寸按照椭圆曲线方程 (1) 设计：

$$[0007] \quad \frac{x^2}{\left(\frac{L}{2\sqrt{1-\frac{H_0^2}{H_1^2}}}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{H_1}{2}\right)^2} = 1 \quad (1)$$

[0008] 其中 L 是冷却通道总长度， H_1 、 H_0 分别是最大、最小肋宽，x、y 分别是肋上任一点的横坐标、纵坐标，原点是肋的中心。

[0009] 冷却液通过本发明的变截面冷却通道在喉道处加速到最大速度并获得最大换热性能，确保具有极高热流的喉道壁温控制在安全使用范围之内；按照椭圆曲线方程的肋使得本发明的冷却装置具有流动无分离、流阻小等优点。

[0010] 还提供了一种应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置的构造方法，包括以下步骤：

[0011] (1) 开始；

[0012] (2) 确定高马赫数喷管喉道热流分布；

[0013] (3) 确定冷却液流量；

[0014] (4) 确定冷却通道的最小、最大宽度 P_1 、 P_0 ；

[0015] (5) 根据公式 (1) 确定肋上各点的坐标 x、y；

[0016] (6) 确定进口汇流槽宽 M、出口汇流槽宽 N、槽深 W、进水孔直径 D1、出水孔直径 D2；

[0017] (7) 获得喉道的换热系数；

[0018] (8) 获得喉道壁面的温度分布；

[0019] (9) 判断最高壁面温度是否小于安全使用温度，是则执行步骤 (10)，否则执行步骤 (3)；

[0020] (10) 判断流阻是否小于预定要求，是则执行步骤 (11)，否则执行步骤 (6)；

[0021] (11) 确定该冷却装置的参数。

附图说明

[0022] 图 1 是二维喷管喉道区域的高度分布示意图。

[0023] 图 2 是喷管喉道区域热流密度分布示意图。

[0024] 图 3a 是根据本发明的冷却通道以及肋的结构示意图。

[0025] 图 3b 是肋的设计示意图。

[0026] 图 3c 是根据本发明的冷却装置的结构示意图。

[0027] 图 4 是喉道区域换热系数分布示意图。

[0028] 图 5 是根据本发明的冷却装置的构造方法的流程图。

[0029] 图 6 是马赫数 6 的二维喷管喉道处壁面温度分布云图。

具体实施方式

[0030] 如图 3a-3c 所示，这种应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置，其包括冷却液依次

流过的进水孔 1、进口汇流槽 2、冷却通道 3、出口汇流槽 4、出水孔 5，冷却通道是两个肋 6 之间的空隙或一个肋与冷却装置的壁面 7 之间的空隙，肋的尺寸按照椭圆曲线方程 (1) 设计：

$$[0031] \quad \frac{x^2}{\left(\frac{L}{2\sqrt{1-\frac{H_0^2}{H_1^2}}}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{H_1}{2}\right)^2} = 1 \quad (1)$$

[0032] 其中 L 是冷却通道总长度， H_1 、 H_0 分别是最大、最小肋宽， x 、 y 分别是肋上任一点的横坐标、纵坐标，原点是肋的中心。

[0033] 冷却液通过本发明的变截面冷却通道在喉道处加速到最大速度并获得最大换热性能，确保具有极高热流的喉道壁温控制在安全使用范围之内；按照椭圆曲线方程的肋使得本发明的冷却装置具有流动无分离、流阻小等优点。

[0034] 另外， H_1 、 H_0 通过公式 (2) 确定

$$[0035] \quad P_1 + H_1 = H_0 + P_0 = S \quad (2)$$

[0036] 其中 P_1 、 P_0 分别是冷却通道的最小、最大宽度， P_1/P_0 取 1/2-1/5；S 是相邻两个冷却通道的间距。

[0037] 另外，进口汇流槽宽 M、出口汇流槽宽 N、槽深 W、进水孔直径 D1、出水孔直径 D2 设计时按照通过流速低于 5m/s。

[0038] 另外，在进水孔安装流量控制器与流量计，并且在进水孔、出水孔内安装温度传感器和压力传感器。

[0039] 另外，所述温度传感器是热电偶。

[0040] 如图 5 所示，还提供了一种应用于高马赫数喷管喉道的冷却装置的构造方法，包括以下步骤：

[0041] (1) 开始；

[0042] (2) 确定高马赫数喷管喉道热流分布；

[0043] (3) 确定冷却液流量；

[0044] (4) 确定冷却通道的最小、最大宽度 P_1 、 P_0 ；

[0045] (5) 根据公式 (1) 确定肋上各点的坐标 x 、 y ；

[0046] (6) 确定进口汇流槽宽 M、出口汇流槽宽 N、槽深 W、进水孔直径 D1、出水孔直径 D2；

[0047] (7) 获得喉道的换热系数；

[0048] (8) 获得喉道壁面的温度分布；

[0049] (9) 判断最高壁面温度是否小于安全使用温度，是则执行步骤 (10)，否则执行步骤 (3)；

[0050] (10) 判断流阻是否小于预定要求，是则执行步骤 (11)，否则执行步骤 (6)；

[0051] (11) 确定该冷却装置的参数。

[0052] 众所周知，管道湍流换热系数与管道雷诺数的 0.8 方成正比，即在流量一定的前提下，换热系数与通道水力直径的 0.8 成反比。可见，在局部极高热流区域可以通过改变通道截面来提高局部换热系数，从而提高冷却装置的整体换热性能，同时又可以避免冷却液持续高速导致的高流阻损失。因此，变截面设计是冷却高马赫数喷管的一条有效的途径。

[0053] 以下给出一个具体实施例。

[0054] 来流马赫数 6 喷管, 总温 1650K, 喉道处通过流场计算得到对流换热系数为 $13000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, 在结构入口处的对流换热系数为 $1400\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 。采用变截面通道设计, 具体尺寸见表 1。冷却液为水, 总水量为 $18\text{kg}/\text{s}$, 入口压力 2MPa。冷却液在冷却通道入口处流速为 $10\text{m}/\text{s}$, 对应雷诺数为 62000, 计算得到对流换热系数为 $34000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 。冷却液在喉道处加速为 $25\text{m}/\text{s}$, 对应雷诺数为 90000, 计算得到喉道换热系数为 $80000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 。采用 ANSYS 软件对喉道结构进行二维传热计算, 材质为锆青铜, 计算得到喉道壁面温度分布如图 6 所示, 其中最高温度达到 625K, 低于锆铜合金 670K 的安全使用温度, 满足冷却要求。同时, 冷却液在汇流槽内水速为 $2.4\text{m}/\text{s}$, 在进口管道内的水速为 $4.6\text{m}/\text{s}$ 。整个 ;冷却装置的压力损失为 3 大气压, 小于入口压力的 $1/5$ 。

[0055]

结构参数	L	H ₁	H ₀	P ₁	P ₀	S	W	D ₁	D ₂	M	N	W
(mm)	200	5	2	2	5	7	500	15	15	15	15	9
数量	冷却通道			进水孔			出水孔					
(个)	72			23			23					

[0056] 表 1

[0057] 本发明最主要的优点是 : 针对喷管喉道基于热流分布中间高、两端低的特点, 设计冷却通道变截面构型, 从而在喉道处获得最大的换热系数, 并确保通道内无流动分离、小流阻。与传统的圆管或者矩形通道相比, 本发明的冷却效率有了很大提高, 可以在冷却液用量相同的条件下获得更高的冷却效率。该发明对于长时间运行的高马赫数、高总温喷管的研制与安全使用有着重要的意义。

[0058] 以上所述, 仅是本发明的较佳实施例, 并非对本发明作任何形式上的限制, 凡是依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰, 均仍属本发明技术方案的保护范围。

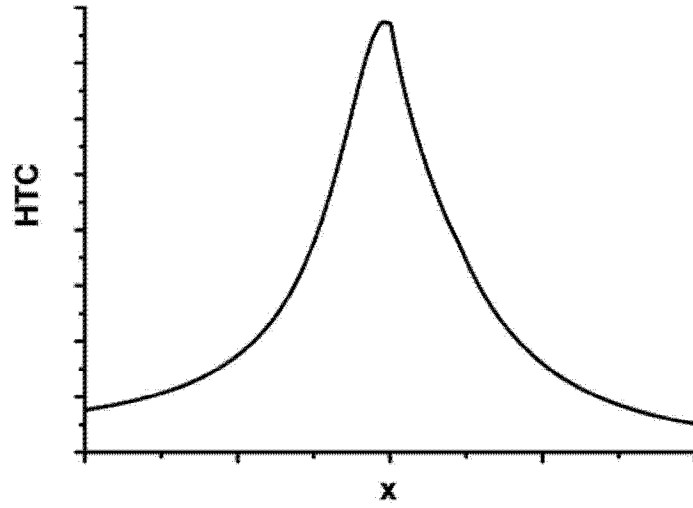


图 1

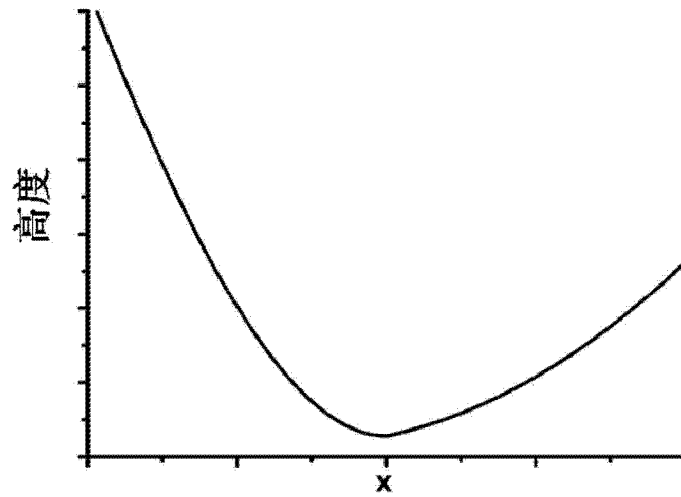


图 2

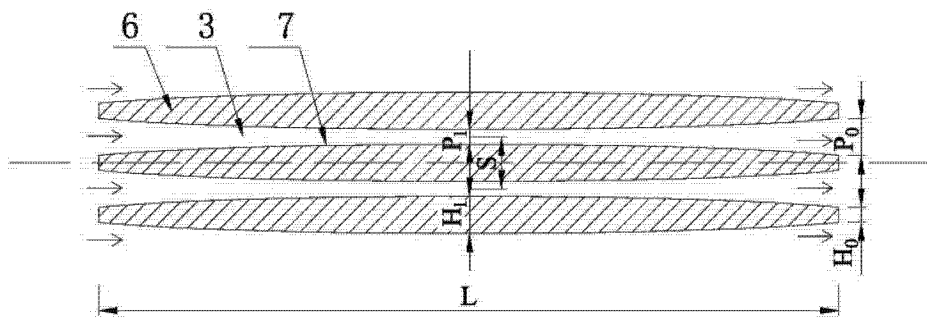


图 3a

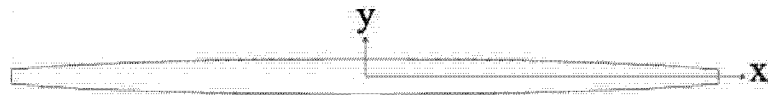


图 3b

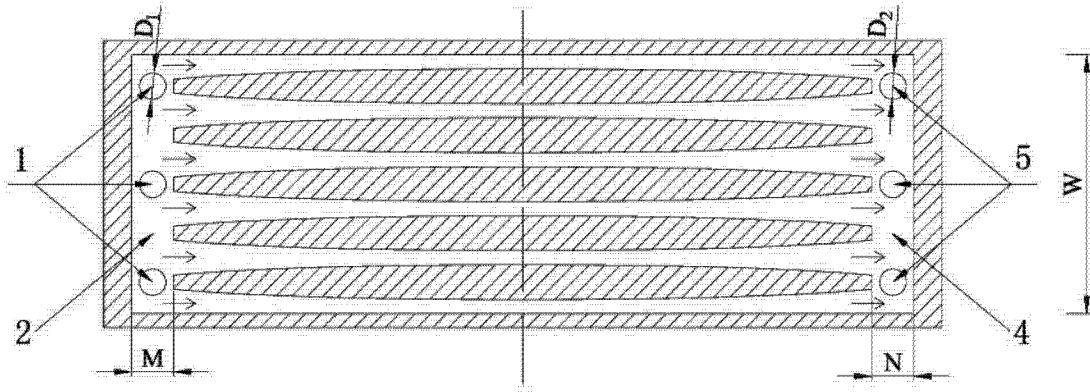


图 3c

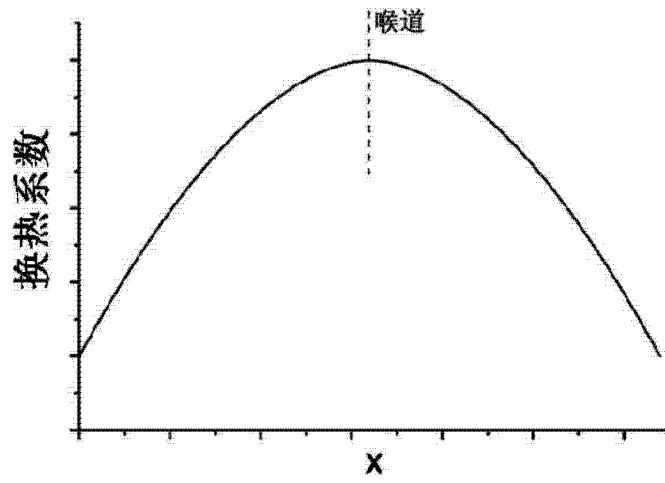


图 4

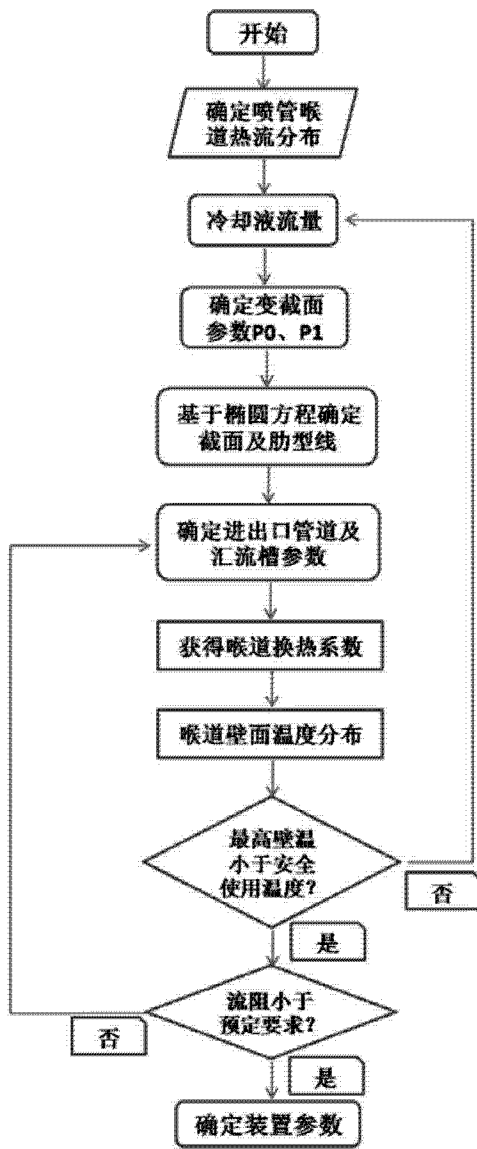


图 5

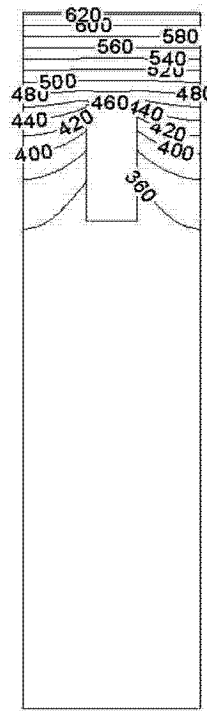


图 6