



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104729824 B
(45)授权公告日 2017.06.30

(21)申请号 201510107934.X

(56)对比文件

(22)申请日 2015.03.12

CN 103149237 A, 2013.06.12,
JP H0552701 A, 1993.03.02,
AT 382705 B, 1987.04.10,
JP H0552701 A, 1993.03.02,
CN 102099130 A, 2011.06.15,

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104729824 A

(43)申请公布日 2015.06.24

审查员 冯玮

(73)专利权人 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)

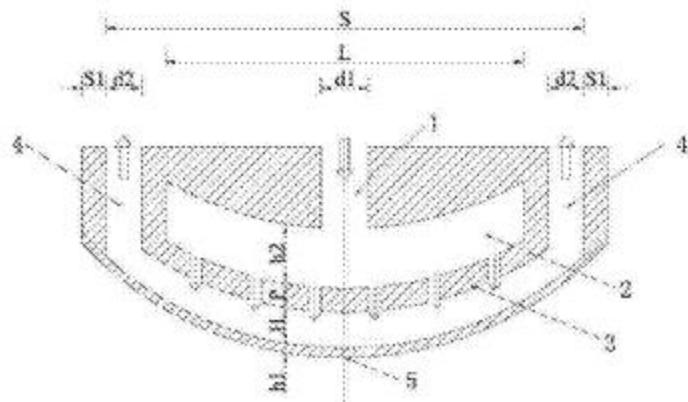
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

一种用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装
置及其构造方法

(57)摘要

本发明公开了一种用于冷却高马赫数喷管
喉道的换热装置,其大大提高换热性能、有效带
走喉道热量、降低壁温、与管道湍流换热方式相
比可以使用少量的冷却液获得更好的冷却效果,
能够保证高马赫数、高总温与总压喷管长时间安
全工作。其包括集流槽、多孔板、进水孔、出水孔,
多孔板设在集流槽的底部并具有按照指定方式
排列的若干通孔,多孔板的中心对应高马赫数喷
管喉道的中心且多孔板的曲率与喉道壁面的曲
率相同,多孔板的中心与喉道的中心的间距为H,
进水孔设在集流槽的顶部且进水孔的中心对应
喉道的中心,出水孔设在多孔板和喉道壁面之间
通道的末端。还提供了这种换热装置的构造方
法。



1. 一种用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置,其特征在于:其包括集流槽(2)、多孔板(3)、进水孔(1)、出水孔(4),多孔板设在集流槽的底部并具有按照指定方式排列的若干通孔,多孔板的中心对应高马赫数喷管喉道(5)的中心且多孔板的曲率与喉道壁面的曲率相同,多孔板的中心与喉道的中心的间距为H,进水孔设在集流槽的顶部且进水孔的中心对应喉道的中心,出水孔设在多孔板和喉道壁面之间通道的末端。

2. 根据权利要求1所述的用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置,其特征在于:所述出水孔的数量为两个,分布在进水孔的两侧。

3. 根据权利要求2所述的用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置,其特征在于:所述通孔的直径为D,H/D的值为3-5。

4. 根据权利要求3所述的用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置,其特征在于:所述通孔的竖向孔间距为 S_x ,横向孔间距为 S_y , S_x/D 、 S_y/D 的值均为5-10。

5. 根据权利要求4所述的用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置,其特征在于:在所述进水孔安装流量计和流量控制器,在所述集流槽内安装流量计,控制集流槽内冷却剂的流量小于等于1m/s。

6. 根据权利要求5所述的用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置,其特征在于:在所述进水孔和出水孔均安装温度传感器、压力传感器。

7. 一种根据权利要求1所述的用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置的构造方法,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载荷分布;
- (3) 确定冷却剂流量;
- (4) 确定多孔板的几何参数;
- (5) 确定集流槽的几何参数;
- (6) 确定进水孔、出水孔的管道参数;
- (7) 确定喉道壁面的换热系数;
- (8) 判断最高壁面温度是否小于安全使用温度,是则执行步骤(9),否则执行步骤(3);
- (9) 判断流阻是否小于预定要求,是则执行步骤(10),否则执行步骤(5);
- (10) 确定该换热装置的参数。

一种用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置及其构造方法

技术领域

[0001] 本发明属于高超声速风洞的技术领域,具体地涉及一种用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置,以及这种换热装置的构造方法。

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,喷管的喉道(横截面最小处)均具有微小尺寸,如图1所示,其中y坐标表示喷管型面高度,x坐标表示喷管沿轴向距离。例如,对于马赫数6.5、出口为 $500 \times 500\text{mm}$ 的二维喷管,喉道高度仅为4.5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6.5二维喷管为例,当气流总温为1800K、总压6.5MPa时,喷管喉道处的热流密度将高达 15MW/m^2 ,仅比太阳表面热流密度低一个量级,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螺旋形(对于轴对称喷管)或者圆形、矩形截面通道(对于二维、三维矩形截面喷管),将冷却剂导入通道内形成充分发展的管道湍流,利用对流换热机制吸收管壁热量、降低壁温。这种基于管道湍流的换热方式具有结构简单、易于加工,并且冷却剂流阻较小等优点,是目前几乎所有喷管采用的冷却方式。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(RJTF)包括马赫数4、6的二维矩形喷管。喷管均采用高压水冷系统,通道由深孔转头沿展向加工。冷却水通入圆形通道,以圆管湍流换热机制吸收壁面热量。美国Glenn研究中心建造的马赫数6自由射流风洞(HTF),其主喷管也采用了管道水冷结构。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。对于喷管热防护也都采用了管道湍流的冷却方式。

[0004] 众所周知,管道湍流换热系数与管道雷诺数的0.8次方成正比。为了获得高效的换热性能,需要很大的雷诺数。这就对冷却剂用量提出了很高的要求。因此,基于管道湍流换热的冷却方式通常需要大量的冷却剂。对于高马赫数喷管冷却要求,难以通过持续增加冷却剂流量进一步提高换热性能。

[0005] 随着马赫数的进一步提高,喷管,尤其是二维喷管喉道处的热载荷将急剧增大。这是由于对于出口尺寸相同的喷管,随着马赫数的提高,喉道高度将减小,同时与飞行马赫数对应的气流总温、总压也将增大。例如,具有相同出口尺寸($500 \times 500\text{mm}$)的二维喷管,马赫7喷管喉道热流是马赫6喷管的3倍。这时,如果仍采用传统的管道湍流换热方式将难以进行有效地冷却,确保喉道壁面温度控制在材料安全使用温度之内。因此,对于更高马赫数条件下长时间运行的风洞喷管,如何有效地冷却喷管喉道是亟需关注与研究的问题。

发明内容

[0006] 本发明的技术解决问题是：克服现有技术的不足，提供一种用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置，其大大提高换热性能、有效带走喉道热量、降低壁温、与管道湍流换热方式相比可以使用少量的冷却液获得更好的冷却效果，能够保证高马赫数、高总温与总压喷管长时间安全工作。

[0007] 本发明的技术解决方案是：这种用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置，其包括集流槽、多孔板、进水孔、出水孔，多孔板设在集流槽的底部并具有按照指定方式排列的若干通孔，多孔板的中心对应高马赫数喷管喉道的中心且多孔板的曲率与喉道壁面的曲率相同，多孔板的中心与喉道的中心的间距为H，进水孔设在集流槽的顶部且进水孔的中心对应喉道的中心，出水孔设在多孔板和喉道壁面之间通道的末端。

[0008] 由于高马赫数喷管喉道区域的热流呈现中间高、两端迅速降低的分布，因此基于喉道的这种热流分布特征，本发明采用这样的结构：多孔板设在集流槽的底部并具有按照指定方式排列的若干通孔，多孔板的中心对应高马赫数喷管喉道的中心且多孔板的曲率与喉道壁面的曲率相同，多孔板的中心与喉道的中心的间距为H，进水孔设在集流槽的顶部且进水孔的中心对应喉道的中心，出水孔设在多孔板和喉道壁面之间通道的末端，这样冷却液从位于喉道中心的集流槽流入多孔板，形成高速射流冲刷喉道壁面，再由位于多孔板和喉道壁面之间通道的末端的出水孔流出，从而保证喉道处受到最为有效的冲刷作用，喉道处的换热系数最大，所以大大提高换热性能、有效带走喉道热量、降低壁温、与管道湍流换热方式相比可以使用少量的冷却液获得更好的冷却效果，能够保证高马赫数、高总温与总压喷管长时间安全工作。

[0009] 还提供了一种用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置的构造方法，包括以下步骤：

- [0010] (1) 开始；
- [0011] (2) 确定高马赫数喷管喉道的热载荷分布；
- [0012] (3) 确定冷却剂流量；
- [0013] (4) 确定多孔板的几何参数；
- [0014] (5) 确定集流槽的几何参数；
- [0015] (6) 确定进水孔、出水孔的管道参数；
- [0016] (7) 确定喉道壁面的换热系数；
- [0017] (8) 判断最高壁面温度是否小于安全使用温度，是则执行步骤(9)，否则执行步骤(3)；
- [0018] (9) 判断流阻是否小于预定要求，是则执行步骤(10)，否则执行步骤(5)；
- [0019] (10) 确定该换热装置的参数。

附图说明

[0020] 图1是二维喷管喉道区域的高度分布示意图，y坐标表示喷管型面高度，x坐标表示喷管沿轴向距离。

[0021] 图2是根据本发明的用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置的结构示意图。

- [0022] 图3是图2中多孔板的通孔的排列示意图。
- [0023] 图4是喷管喉道区域热流密度分布示意图,y坐标表示热流密度大小,x坐标表示喷管沿轴向距离。
- [0024] 图5是喉道处换热系数示意图,y坐标表示对流换热系数大小,x坐标表示喷管沿轴向距离。
- [0025] 图6是根据本发明的换热装置的构造方法的流程图。
- [0026] 图7是马赫数为6的二维喷管喉道壁面温度分布云图。
- [0027] 图8是马赫数为7的二维喷管喉道壁面温度分布云图。

具体实施方式

[0028] 如图2所示,这种用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置,其包括集流槽2、多孔板3、进水孔1、出水孔4,多孔板设在集流槽的底部并具有按照指定方式排列的若干通孔,多孔板的中心对应高马赫数喷管喉道5的中心且多孔板的曲率与喉道壁面的曲率相同,多孔板的中心与喉道的中心的间距为H,进水孔设在集流槽的顶部且进水孔的中心对应喉道的中心,出水孔设在多孔板和喉道壁面之间通道的末端。

[0029] 由于高马赫数喷管喉道区域的热流呈现中间高、两端迅速降低的分布,因此基于喉道的这种热流分布特征,本发明采用这样的结构:多孔板设在集流槽的底部并具有按照指定方式排列的若干通孔,多孔板的中心对应高马赫数喷管喉道的中心且多孔板的曲率与喉道壁面的曲率相同,多孔板的中心与喉道的中心的间距为H,进水孔设在集流槽的顶部且进水孔的中心对应喉道的中心,出水孔设在多孔板和喉道壁面之间通道的末端,这样冷却液从位于喉道中心的集流槽流入多孔板,形成高速射流冲刷喉道壁面,再由位于多孔板和喉道壁面之间通道的末端的出水孔流出,从而保证喉道处受到最为有效的冲刷作用,喉道处的换热系数最大,所以大大提高换热性能、有效带走喉道热量、降低壁温、与管道湍流换热方式相比可以使用少量的冷却液获得更好的冷却效果,能够保证高马赫数、高总温与总压喷管长时间安全工作。

[0030] 另外,所述出水孔的数量为两个,分布在进水孔的两侧。这样能够加快冷却剂的流出速度,提高换热效率。

[0031] 另外,所述通孔的直径为D,H/D的值为3-5。其中,孔径D是影响射流雷诺数与出口速度的主要参数,多孔板与壁面距离H决定了射流冲击的强度与换热系数分布。因此,D、H是最重要的两个设计参数。高速射流的雷诺数是决定其换热性能的主要参数。射流雷诺数要求不小于10000以获得较高的换热性能。因此,对于给定的冷却液流量,根据射流雷诺数的大小可以确定孔径D。H与D之比是决定喉道壁面换热系数的分布特征。如果,H/D过小,喉道壁面的换热系数分布将很不均匀;而H/D过大,那么换热性能的整体增益量将减少。因此,根据射流流场计算分析,H/D一般取值为3-5。

[0032] 另外,所述通孔的竖向孔间距为S_x,横向孔间距为S_y,S_x/D,S_y/D的值均为5-10。孔-孔间距S_x、S_y取值也与孔径相关。S_x/D,S_y/D过大将导致喉道壁面换热系数分布不均匀,影响冷却的整体效果;比值过小将减小射流出口速度与雷诺数,影响换热性能的增益。因此,S_x/D,S_y/D一般取值范围是5-10。

[0033] 另外,在所述进水孔安装流量计和流量控制器,在所述集流槽内安装流量计,控制

集流槽内冷却剂的流量小于等于1m/s。设计要求为集流槽内冷却液流速很低,以保证冷却液通过多孔板是流量的均匀分布,同时低流速可以减少汇流槽流动引起的阻力。因此,集流槽内流速设计值为不超过1m/s。

[0034] 另外,在所述进水孔和出水孔均安装温度传感器、压力传感器,用来检测冷却液的进出口温度与压力,从而确保冷却液正常工作。

[0035] 如图6所示,还提供了一种用于冷却高马赫数喷管喉道的换热装置的构造方法,包括以下步骤:

- [0036] (1) 开始;
- [0037] (2) 确定高马赫数喷管喉道的热载荷分布;
- [0038] (3) 确定冷却剂流量;
- [0039] (4) 确定多孔板的几何参数;
- [0040] (5) 确定集流槽的几何参数;
- [0041] (6) 确定进水孔、出水孔的管道参数;
- [0042] (7) 确定喉道壁面的换热系数;
- [0043] (8) 判断最高壁面温度是否小于安全使用温度,是则执行步骤(9),否则执行步骤(3);
- [0044] (9) 判断流阻是否小于预定要求,是则执行步骤(10),否则执行步骤(5);
- [0045] (10) 确定该换热装置的参数。

[0046] 以下给出两个具体实施例。

[0047] 实施例1:

[0048] 来流马赫数6的二维喷管,总温1600K、总压5.5MPa。通过流场计算得到喷管喉道处高温气流的对流传热系数为13000W/m²K。换热装置的具体参数见表1。冷却液为水,进水孔压力为2MPa,总水量8kg/s,射流流速为3.4m/s,对应雷诺数为26000,数值计算得到冲击板面的平均对流换热系数为240000W/(m²K)。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510K,显著低于锆铜合金670K的安全使用温度,满足冷却要求。同时,冷却液在进出水孔管道内的水速低于2.5m/s,进出水孔压降仅为1.5大气压,压力损失小于入口压力的1/5。

[0049]	结构参数	D	Sx	Sy	L	W	h1
	(mm)	5	25	25	150	500	4
	结构参数	d1	d2	S	h2	P	H
	(mm)	20	15	200	25	10	15

[0050] 表1

[0051] 实施例2:

[0052] 来流马赫数7的二维喷管,总温2000K、总压8MPa。通过流场计算得到喷管喉道处高温气流的对流传热系数为18000W/m²K。换热装置的具体参数见表2。冷却液为水,进水孔压力为3MPa,总水量15kg/s,射流流速为6.5m/s,对应雷诺数为50000,数值计算得到冲击板面的平均对流换热系数为370000W/(m²K)。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7所示,其中最高温度达到630K,显著低于锆铜合金670K的安全使用温度,满足冷却要求。同时,冷却液在进水孔内的水速低于4m/s,进出水孔压降仅为4大气压,压力损失小于进水孔压力的1/5。

[0053]	结构参数	D	Sx	Sy	L	W	h1
	(mm)	5	25	25	150	500	4

[0054]	结构参数	d1	d2	S	h2	P	H
	(mm)	20	15	200	30	10	15

[0055] 表2

[0056] 由此可见,本发明可以用于具有局部极高热流的各类超声速喷管。

[0057] 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。

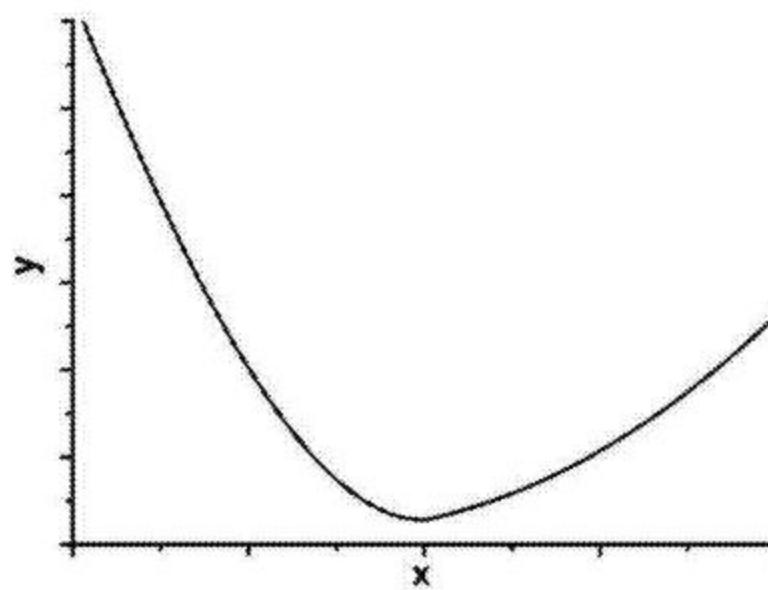


图1

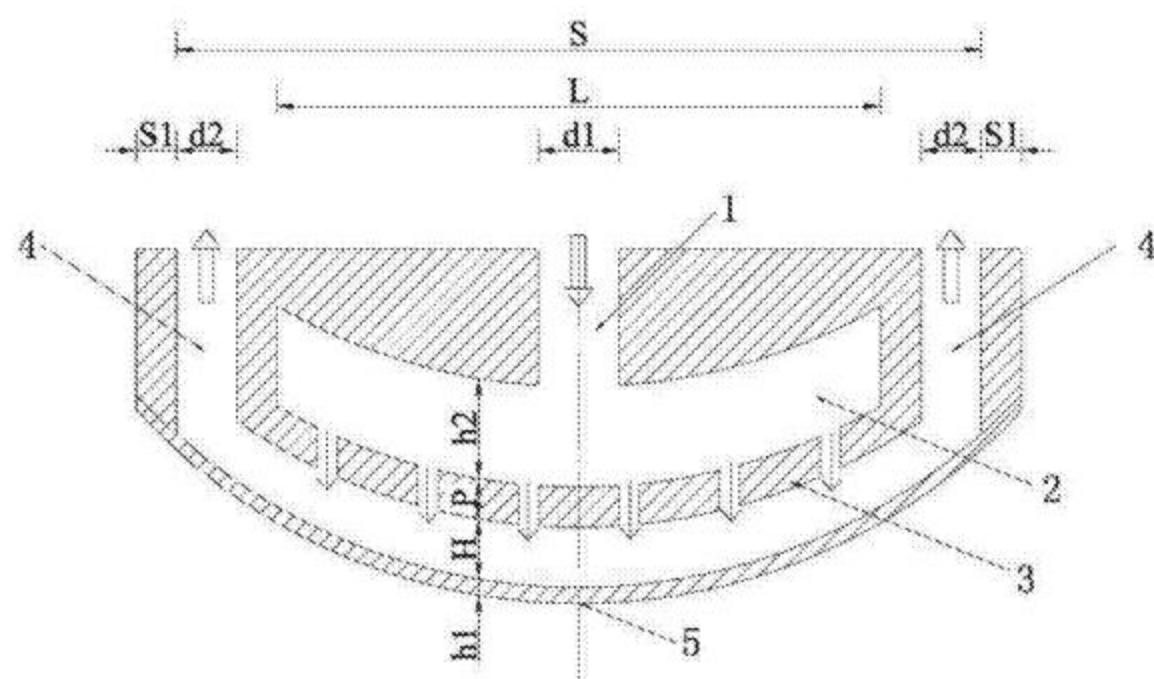


图2

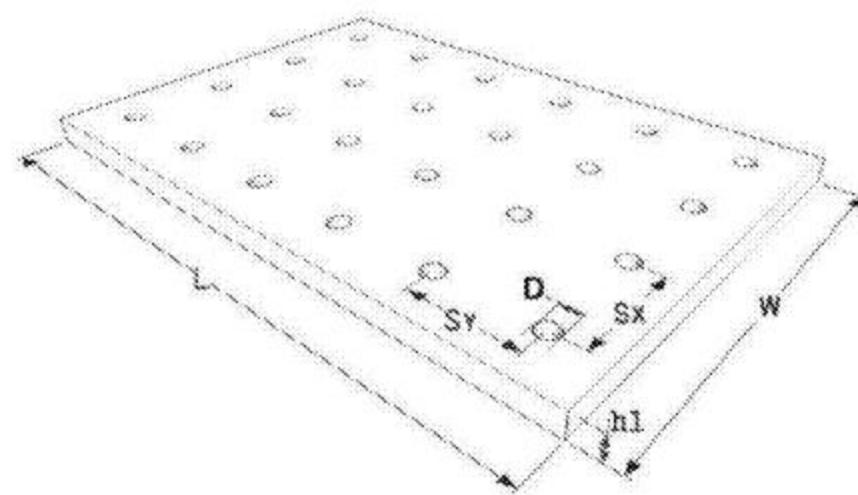


图3

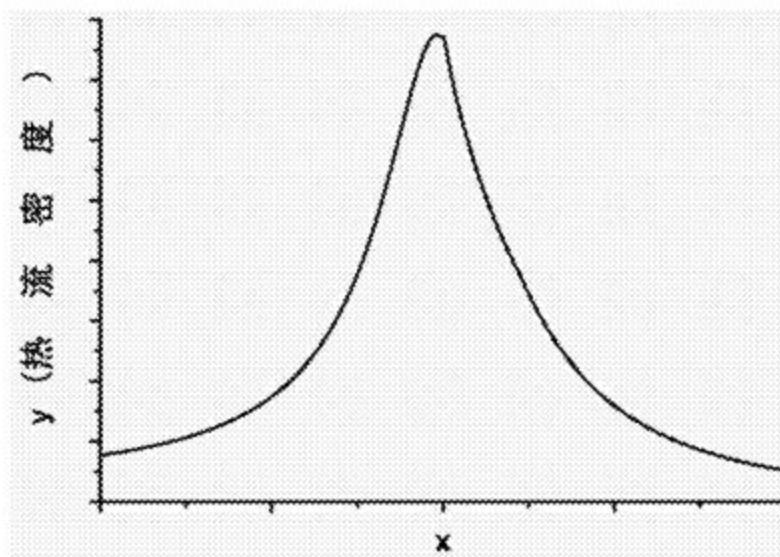


图4

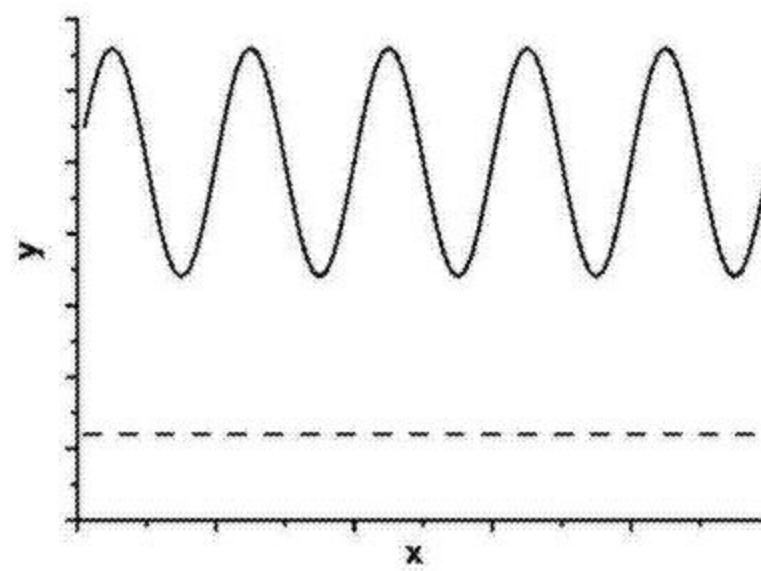


图5

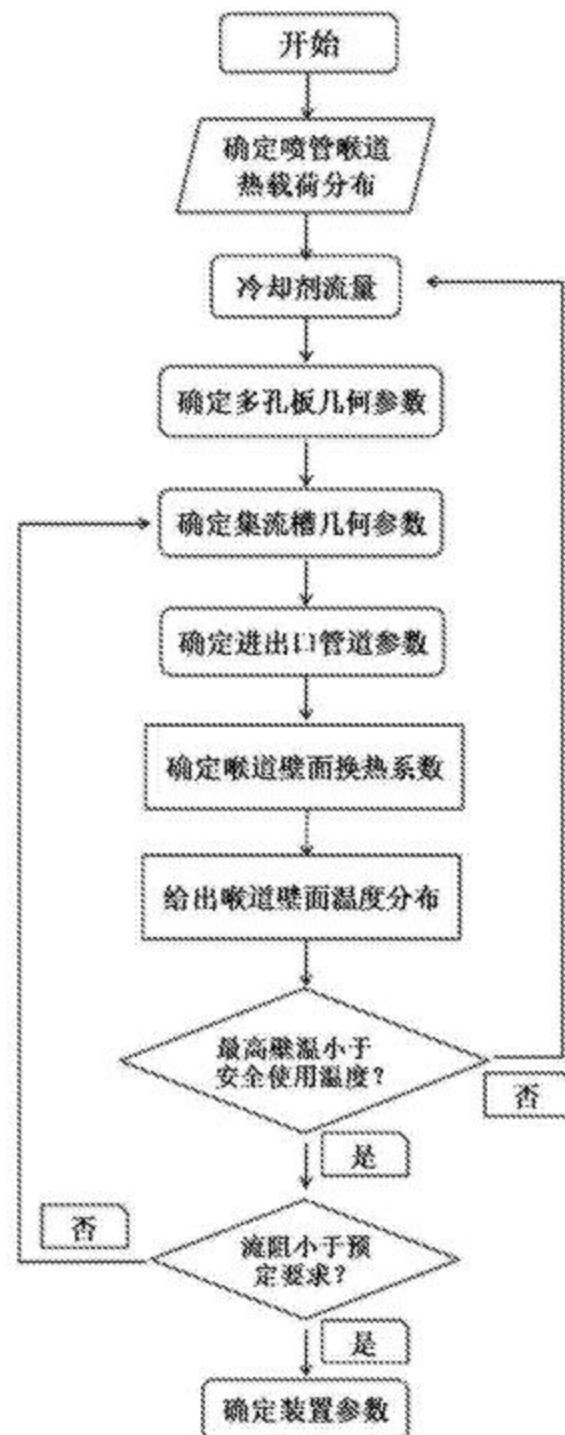


图6



图7

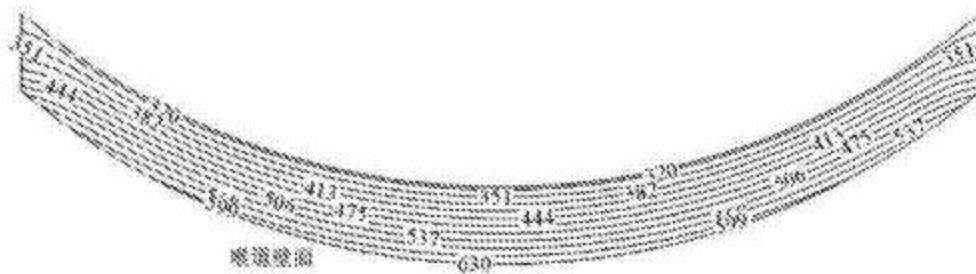


图8