

文章编号: 1000-8055(2005) 03-0380-04

等熵轻质活塞风洞中主要部件尺寸的确定

李立人, 林霞
(上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 等熵轻质活塞风洞是一种工作时间很短的风洞, 作为气源适合于瞬时热传导测量技术的研究工作。在研究了此风洞工作特性的基础上, 提出了确定风洞中主要部件尺寸的方法, 为风洞全面设计提供依据。压力比 $p_0/\bar{p}$ 和 t_{run} 是确定管道尺寸的主要参数, 匹配压力振荡最大振幅的允许值是确定活塞质量的关键。

关键词: 航空、航天推进系统; 风洞; 活塞风洞; 管道; 喉部; 尺寸的确定

中图分类号: O 359. 4

文献标识码: A

Determination of the Main Components' Size for an Isentropic Light Piston Wind Tunnel

LI Li-ren, LIN Xia
(College of Power Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Isentropic light piston wind tunnel is a kind of short working duration tunnel. It is adequate to be used for the research work of instantaneous heat transfer measurement. Based on the understanding of the wind tunnel characteristics, a method for determining the sizes of its main components was presented. Pressure ratio and working time duration t_{run} are key parameters to the determination of the tube size, and the mass of the piston depends on the allowed peak value of the matching pressure oscillation.

Key words: aerospace propulsion system; wind tunnel; piston tunnel; tube; throat; isentropic

符号表

a —— 声速
 R —— 气体常数
 A —— 管道横截面积
 T —— 温度
 D —— 管道直径
 t —— 时间
 L —— 管道长度
 v —— 体积流率

m_p —— 活塞质量
 W —— 管道内的体积
 $\dot{m}$ —— 质量流率
 γ —— 比热比
 P —— 压力
 λ —— 速度系数
 ΔP —— 匹配压力振荡振幅
 $q(\lambda)$ —— 气动函数
下标
0 —— 初始状态

收稿日期: 2004- 07- 10; 修订日期: 2004- 10- 09

作者简介: 李立人(1946-), 男, 江苏海门人, 上海理工大学动力工程学院教授, 主要从事流体力学理论及工业流体力学研究。

- 1 —— 活塞后部区域 (见图 1)
- 2 —— 活塞前部区域 (见图 1)
- c —— 压缩阶段
- run —— 风洞工作时间
- r —— 高压容器中的值
- 上标
- * —— 喉部
- —— 匹配状态的值

等熵轻质活塞风洞是一种工作时间很短的风洞,其结构类似于激波风洞、炮风洞和路得维奇风洞。但其工作原理是不同的,文献[1]对此作了较详细的比较。由于活塞压缩时间和风洞工作时间都小于1 s,因此它可作为气源适合于瞬时热传导测量技术的研究,已用于涡轮叶片的气膜冷却研究^[2, 3]。

这类风洞的结构示意图如图 1 所示^[4]。

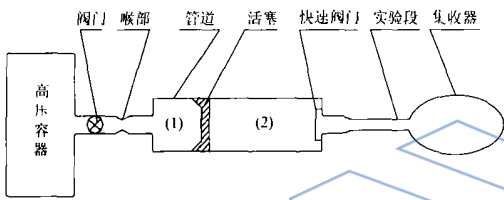


图1 等熵轻质活塞风洞示意图

Fig. 1 Diagram of an isentropic light piston tunnel

它的主要部件是一根直径不大的长管道和一个可以在管道内自由运动密封性又很好的活塞。起初活塞在管道的最左端,管内空气是一个大气压,阀门和快速阀门都是关闭的。当左侧阀门一打开,高压容器中的高压空气就推动活塞向右运动,将原来管道内一个大气压的空气压缩在管道的(2)区域内,压力与温度都随之上升,来自于高压容器中的空气充满了(1)区域内。随着压缩时间的增加,(2)区域越来越小,其中的空气压力、温度也越来越高,一旦(2)区域内的空气压力达到了实验所需的压力值,快速阀门就立即打开,(2)区域的空气就将流经实验段,用于实验,因此(2)区域内的空气就是用于做实验的气源。(2)区域中的高压高温空气相当于燃气透平中的主流,实验段侧壁引入一小股二次空气射流就相当于冷却工质。在设计此风洞时如能使实验空气压缩后的温度与二次射流温度之比等于燃气透平中主流温度与冷却气流温度之比,那么这种风洞就能产生燃气透平中典型的工况。如冷却气流的温度采用室温,那么

(2)区域中的空气压缩后的温度只要求600~700 K,这样管道的长度约3~5 m,管道内的活塞很轻,一般只有几十克。

如果实验过程中,从高压容器中进入管道的空气的体积流量与从(2)区域内流出且流经实验段的空气的体积流量相等的话,那么(2)区域内的空气压力就能维持恒定,(称为匹配压力,记为 $\bar{P}$),这点往往是实验者所希望的。

在活塞压缩阶段,(2)区域内空气的压力随时间是线性变化的,这可从能量守恒定律及气体的状态方程得到^[4]:

$$\frac{P_0 W}{\gamma - 1} + \frac{m_r R T_r}{\gamma - 1} + m_r R T_r = \frac{P W}{\gamma - 1}$$

又

$$m_r = \dot{m}_r t$$

所以

$$P = P_0 + \frac{\gamma m_r R T_r}{W} t \tag{1}$$

其中: P_0 为管道内的初始压力。

管内压力随时间变化如图 2 所示。

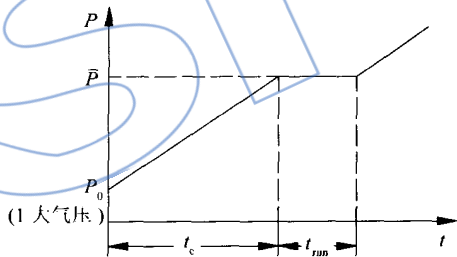


图2 管内压力随时间变化

Fig. 2 Pressure in tube vs time t

图中 t_c 称为压缩时间,是指从左侧阀门打开压缩开始到匹配压力达到且快速阀门打开,即压缩结束的时间段。 t_{run} 称为风洞工作时间,就是指快速阀门打开到活塞以恒速运动至管道右端的时间段。如果活塞到达管道右端后,还不关闭左端阀门,管内压力将继续上升。

必须指出,图2中管内压力随时间 t 的变化是在忽略活塞质量,即忽略活塞的动能(因为活塞质量只有几十克),忽略活塞运动时的摩擦,忽略与外界的热交换,即可视为等熵压缩(因为压缩时间和风洞工作时间均小于1 s),忽略管内空气自身的动能(因为管内空气的速度远小于音速)的假设下得到的,这些假设对于认识此种风洞的工作机理是可行的。但活塞再轻也是有质量的,活塞质量对图2所示的压力变化的最大影响在于在风洞工作时间 t_{run} 内的匹配压力不再是水平线而是振荡

的,而且在快速阀门打开的瞬间,压力振荡的幅度最大,记为 ΔP_{2c} ,且它与活塞质量 m_p 有如下关系^[5]:

$$m_p = n \left(\frac{\Delta P_{2c}}{\bar{P}} \right)^2 \quad (2)$$

其中:
$$n = \left(\frac{L}{X_c} \right)^3 \frac{A \bar{P} (L - X_c)}{\gamma \bar{u}_p^2}$$

如果 $\Delta P_{2c}/\bar{P}$ 允许 $\leq 3\%$ 或其它值,那么方程(2)就为风洞设计提供了约束条件。

本文在了解认识此类风洞工作机理和研究了此类风洞特征的基础上,提出了确定风洞主要部件(管道、活塞质量、喉部面积等)尺寸的方法,从而为全面设计风洞提供依据。

1 公式推导

1.1 t_{run} 与管道体积、实验段喉部面积和压力比的关系

在风洞工作时间 t_{run} 内,从高压容器中进入管道的体积流量^[5]为:

$$V_1 = \frac{\dot{m}_r RT_r}{\bar{P}}$$

而由文献[6]知此时从实验段的喉部流出的质量流量为:

$$\dot{m}_2 = K \frac{P}{T} A_2^*$$

其中:
$$K = \frac{1}{R} \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

那么从(2)区域中流出的体积流量为:

$$V_2 = \beta \bar{a}_2 A_2^*$$

其中:
$$\beta = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

正如前述,在 t_{run} 内 $V_1 = V_2$

所以:

$$\dot{m}_r RT_r = \beta \bar{a}_2 A_2^* \bar{P} \quad (3)$$

将上式及从等熵关系得到的:

$$\bar{a}_2 = a_0 \left(P/P_0 \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}$$

代入文献[7]中的 t_{run} 表达式(此表达式是在前述的假设条件下得到的)

可得:
$$t_{run} = \frac{W}{\beta a_0 A_2^*} \left(\frac{P_0}{\bar{P}} \right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} \quad (4)$$

其中:
$$a_0 = \sqrt{\gamma R T_0}$$

1.2 管道内面积 A 与压力振幅的关系

由文献[4]可知:

$$\frac{\Delta P}{\bar{P}} = 2\beta\gamma \left(\frac{A_2^*}{A} \right)$$

对于空气,将 $\gamma = 1.4$ 代入,可得:

$$\frac{\Delta P}{\bar{P}} = 1.62 \frac{A_2^*}{A} \quad (5)$$

这说明如果 $\Delta P_{2c}/\bar{P}$ 允许 $\leq 3\%$,那么可知管道面积至少应为实验段喉部面积的 54 倍左右。

1.3 达到匹配压力时活塞的速度 $\bar{u}_p$ 与面积比、压力比的关系为^[7]

$$\bar{u}_p = \frac{\dot{m}_r RT_r}{\bar{P} A}$$

将公式(3)代入上式可得:

$$\bar{u}_p = \beta a_0 \left(\frac{A_2^*}{A} \right) \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \quad (6)$$

1.4 活塞质量 m_p 的公式

如前述公式(2)所示:

$$m_p = n \left(\frac{\Delta P_{2c}}{\bar{P}} \right)^2$$

由文献[5]可知:

$$X_c = L \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \right]$$

其中: X_c 表示活塞从管道左端 ($X = 0$) 起被压缩到压缩结束,即右端的快速阀门打开时所处的位置,所以其中的 n 可改为:

$$n = \left[1 - \left(\frac{P_0}{\bar{P}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^3 \frac{W \bar{P}}{\gamma \bar{u}_p^2} \left(\frac{P_0}{\bar{P}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (\text{kg}) \quad (7)$$

2 风洞主要部件结构尺寸的确定

所谓主要部件结构尺寸的确定就是指在已知管道内空气初始压力、温度和高压容器中空气压力、温度的条件下,求出此风洞的管道体积、长度、直径、实验段的喉部尺寸、高压容器与管道间的喉部面积及活塞质量等以满足所要求的匹配压力、实验段马赫数、风洞工作时间和实验段的横截面积,具体步骤如下:

2.1 计算实验段喷管的喉部面积 A_2^*

首先把所要求的实验段马赫数 M_a 转换成速度系数 λ ,根据气体动力学中的喷管理论有:

$$A_2^* = A_{test} q(\lambda) \quad (8)$$

$$q(\lambda)=\left[\frac{\gamma+1}{2}\right]^{\frac{1}{\gamma-1}}\lambda\left[1-\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\lambda^2\right]^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

式中: A_{test} 为实验段的面积。

如果实验段中的喷管是收缩喷管, 那么 A_2^* 的值表示一个假想的喉部面积, 仅用于计算。

2.2 计算管道的体积 W

根据所要求的风洞工作时间 t_{run} 、压力比 P_0/P 和公式 (4), 可得:

$$W=\beta a_0 A_2^*\left(\frac{P_0}{P}\right)^{-\frac{\gamma+1}{2\gamma}}t_{run}\tag{9}$$

2.3 计算管道横截面积 A 、直径 D 与长度 L

根据公式 (5), 得:

$$A=\frac{1.62A_2^*}{\Delta P_{2c}/P}\tag{10}$$

$$D=\sqrt{4A/\pi}\tag{11}$$

$$L=W/A\tag{12}$$

2.4 计算活塞质量 m_p

根据公式 (6), (7) 分别算出 $\bar{u}_p$ 和 n , 再代入公式 (2) 中得出 m_p 。

2.5 计算高压容器与管道间得喉部面积 A_r^*

由公式 (3) 得出:

$$\dot{m}_r=\frac{\beta \bar{a}_2 A_2^* P}{RT_r}=\frac{\beta \bar{a}_0 A_2^* P}{RT_p}\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}}\tag{13}$$

再根据:

$$\dot{m}_r=K\frac{P_r}{T_r}A_r^*$$

可得:

$$A_r^*=\frac{\dot{m}_r}{K}\frac{T_r}{P_r}\tag{14}$$

对于空气而言: $K=0.0404\left[\frac{s}{m}\sqrt{\frac{K}{m}}\right]$

3 实例计算与分析

根据文献[2], CT-1 等熵轻质活塞风洞用于涡轮叶片薄膜冷却实验中, 其工作时间约为 0.1 s, 实验段的截面尺寸为 $1.34\times1.57\text{ cm}^2$, 马赫数为 0.5, 高压容器中空气压力为 40 bar, 常温。要求匹配压力 $P=12$ 大气压作为薄膜冷却实验中的气源。若允许匹配压力最大振荡的振幅 $\leq 3\%$, 依照前述的计算公式与步骤, 可得管道内体积 $W=2.624\times10^{-2}\text{ m}^3$, 管道长度 $L=3.1\text{ m}$, 直径 $D=10.4\text{ cm}$, 活塞质量 $m_p\leq 72\text{ g}$, $A_r^*=72\text{ mm}^2$ 。CT-1

风洞的实际尺寸: 管道直径 $D=10.2\text{ cm}$, 长度为 3.25 m, 活塞质量 $m_p=60\text{ g}$, $A_r^*=66\text{ mm}^2$ 。将计算结果与之对比后, 可以看到两者还是相当一致的。

从计算过程中, 可以看到匹配压力振荡的最大允许值对确定各部件的尺寸是重要的。如果此值过大, 将影响瞬时冷却实验的测量精度, 如过小, 活塞质量就会很小, 这将给加工制造活塞带来困难, 活塞的强度也难以保证。

4 结 论

(1) 本文推导出的确定等熵轻质活塞风洞主要部件尺寸的公式及方法是可行的。

(2) 压力比 P_0/P 和所要求的风洞工作时间 t_{run} 是确定管道尺寸的主要因素。

(3) 对匹配压力振荡的最大振幅的允许值的选择是确定活塞质量的关键, 建议 $\Delta P_{2c}/P$ 在 2~3% 之间。

(4) 要完成最后的设计还应考虑其他一些因素(如强度、加工工艺、材料选择等)后对上述计算值给予修正。

参考文献:

[1] 孔繁琳, 李立人. 等熵轻质活塞风洞的特征分析[J]. 上海理工大学学报, 2003, 1(25): 28~31.
KONG Fan-lin, LI Li-ren. Characteristic Analysis of an Isentropic Light Pistion Tunnel[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2003, 1(25): 28~31.

[2] Richards B E, Ville J P, Appels C. Film Cooled Small Turbine Blades Research-Film Cooling Effectiveness at Simulated Turbine Condition [R]. *VKI TN 120, June 1976*.

[3] Richards B E, Ville J P, Salemi C. Film Cooling of Heated Turbine Surface at Simulated Condition[A]. *AIAA/SAE 13th Propulsion Conference*[C], July 1977: 11~13.

[4] Jones T V, Schultz D L, Hendley A D. On the Flow in an Isentropic Light Piston Tunnel [R]. *ARC. R&M*, 1973: 3731.

[5] 李立人, 孔繁琳. 等熵轻质活塞风洞中活塞质量对匹配压力振荡的影响[J]. 实验力学, 2003, 4(18): 513~519.
LI Li-ren, KONG Fan-lin. Analysis for the Oscillation of the Matching Pressure in an Isotropic Light Piston Tunnel [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, 4(18): 513~519.

[6] 童秉纲, 孔祥言, 邓国华. 气体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.

[7] 李立人, 孔繁琳, 林霞. 等熵轻质活塞风洞中活塞行程、速度和压力的变化[J]. 实验力学, 2002, 3(17): 333~339.
LI Li-ren, KONG Fan-lin, LIN Xia. Analysis for the Piston Motion in an Isotropic light Piston Tunnel [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 3(17): 333~339.