

膜片非理想打开行为对自由活塞激波风洞运行的影响

朱 浩*, 张冰冰, 余亦甫

(中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

摘要:在自由活塞激波风洞中,主膜片非理想打开行为可能对活塞运动和激波形成产生不同程度的影响。基于膜片的剪切-应变模型和活塞动力学模型,得到了膜片打开-活塞运动的耦合方程组,完成了膜片动态打开过程对活塞运动和常压力驱动时间影响的刻画。研究显示:由于活塞前脸压力和活塞速度之间存在博弈,膜片打开行为的差异性对活塞末端速度影响不大,活塞在压缩管末端可以实现“软着陆”。此结论得到试验证实。试验结果还显示:主膜片非理想打开行为对激波形成的影响较大,但是随着激波的传播,这种影响逐渐减弱。

关键词:自由活塞激波风洞;主膜片;非理想打开行为;活塞运动;激波

中图分类号:V211.751

文献标识码:A

Effect of non-ideal opening behavior of diaphragm on the operation of free piston shock tunnels

ZHU Hao*, ZHANG Bingbing, YU Yifu

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

Abstract: In free piston shock tunnels, the non-ideal opening behavior of the main diaphragm may have different effects on the free piston motion and the shock wave formation. Based on the diaphragm shear-strain model and piston dynamic model, the coupled equations involving piston motion and diaphragm rupture are obtained for the first time, and the effects of the diaphragm opening process on piston motion and driving time under constant pressure are described. Research shows that, due to the interaction between the piston front pressure and the piston speed, the speed of diaphragm rupture or rupture ahead of time has little effect on the free piston terminal speed, and the piston can achieve soft landing at the end of the compression tube. This conclusion is confirmed by test results. Moreover, the test results also show that the non-ideal opening behavior of the main diaphragm has a distinct influence on the formation of the shock wave, and it gradually weakens during the propagation of the shock wave.

Keywords: free piston shock tunnel; main diaphragm; non-ideal opening behavior; free piston motion; shock wave

0 引 言

自由活塞激波风洞是获得高焓值高密度试验气流的重要地面设备。随着高超声速技术的发展,此类风洞日益受到重视^[1-3]。重活塞压缩器,作为自由活塞激波风洞的核心部件,通过重活塞对驱动气体实施压缩,使之达到足够的温度和压力,从而获得强激波。在自由活塞激波风洞中,膜片打开是形成激波的先决

条件。理论上一般假定膜片打开是一个瞬态过程,这使很多问题得以简化,但同时也掩盖了激波形成的复杂过程。基于试验观测,Heshall^[4]对膜片打开后激波的形成进行了更为细致的刻画;Hickman^[5]通过可视化技术观测到膜片打开时存在拟定常的自由射流;Outa等^[6]发现了斜激波和多尺度膨胀波之间的相互作用。一些研究者还通过数值模拟勾勒出膜片打开过程中诸多难以观测到的流动细节^[7-8]。日本NAL-CTA自

收稿日期: 2019-03-01;修订日期: 2019-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(11572303)

* 通信作者 E-mail: zhuha01977@hotmail.com

引用格式: ZHU H, ZHANG B B, YU Y F. Effect of non-ideal opening behavior of diaphragm on the operation of free piston shock tunnels[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(1): 55-59. 朱 浩, 张冰冰, 余亦甫. 膜片非理想打开行为对自由活塞激波风洞运行的影响[J]. 实验流体力学, 2020, 34(1): 55-59.

由活塞发射机构采用 CCD 高速摄像机测量活塞速度,讨论了无量纲速度和压力恢复系数之间的关系,其中涉及膜片开口口径的影响^[9]。

当前的研究重点关注主膜片“非理想”打开行为对活塞运动和激波形成的影响。“非理想”一词包含两层意思:一是膜片打开是一个非瞬态过程;二是膜片打开的最后几何形态也存在差异。本文基于膜片的剪切-应变模型和活塞动力学模型,得到了膜片打开-活塞运动的耦合方程组,分析了膜片非理想打开行为对活塞末端速度的影响规律,同时也研究了膜片非理想打开行为对激波形成和行进的影响。

1 膜片打开模型

在激波管实验中,膜片打开的具体情况在很大程度上依赖于膜片材质本身的延展性:膜片延展性越好,膜片打开得越规则^[10]。在高压气体作用下,初始缝隙出现于膜片痕道,并在痕道交点(膜片中心)形成穿孔;穿孔逐步扩大,形成若干膜瓣,最终膜片打开,形状接近球面(图 1)。膜片初始打开过程比较缓慢,约占整个打开时间的 20%^[10]。厚度 0.157 ~ 0.447 cm 钢质膜片的打开时间约为 800 μs 左右^[11],该膜片厚度范围也为自由活塞激波风洞所采用。基于此,自由活塞激波风洞常压力驱动时间约为膜片打开时间的数倍,两者属于相同量级。

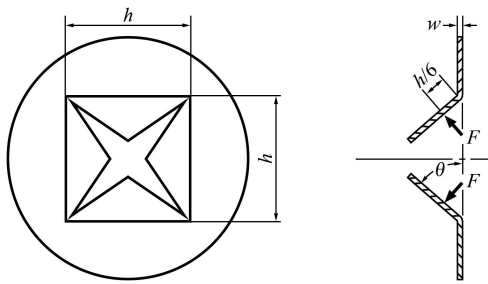


图 1 膜片打开示意图

Fig.1 Sketch of diaphragm opening

膜片打开是一个动态剪切-应变过程,且膜瓣周围的绕流流场十分复杂。假定膜瓣上的应力分布一致,则膜瓣打开角度 θ 可以表示为^[11]:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{4p_{HA,r}\cos\theta}{\rho_d h \tau w} \left[1 - \frac{6}{\cos\theta} \frac{\tau^2}{h^2} \frac{\sigma}{p_{HA,r}} \right] \quad (1)$$

式中: h 为膜瓣宽度, ρ_d 、 τ 分别为膜片密度和厚度, $p_{HA,r}$ 为膜片打开时驱动气体(氦/氩混合气体)的压力, σ 为弯曲应力。在本文中,下标“0”和“r”分别表示活塞运动初始时刻、膜片打开时刻,下标“HA”和“A”分别表示驱动气体、空气,下标“p”表示活塞。

在自由活塞激波风洞中,膜片满足 $w \ll h$ 和 $\frac{\sigma}{p_{HA,r}} = O(1)$,式(1)右端方括号中第 2 项可以忽略。

对式(1)积分 2 次,还可得到:

$$t \approx 4.73 \sqrt{\frac{\rho_d h \tau w}{p_4}} \times 10^4 \quad (2)$$

式中:时间 t 的单位为 μs ; p_4 表示驱动压力(平均意义下约等于 $p_{HA,r}$,可近似以 $p_{HA,r}$ 代替)。利用式(2)可知,当 $t=0$ 时,膜片满足 $\theta=0$ 、 $d\theta/dt=0$,则膜瓣打开至 $\theta=\pi/3$ 位置约需 400 μs ,较为接近文献[11]提供的实际测量值。

2 膜片动态打开对活塞运动的影响

在压缩管中,重活塞在巨大的压力差下加速向下游运动,直至达到峰值速度 $U_{\max}$ (在某个典型状态下,活塞峰值速度 $U_{\max}$ 接近 300 m/s),此时活塞前后压力相等;此后,被压缩气体压力进一步增高,活塞速度快速下降。活塞运动的相关研究参见文献[12-13]。以下讨论膜片打开这一动态过程对活塞压缩带来的影响,藉此完善对活塞压缩过程的刻画。

不失一般性,认为膜片面积等于激波管截面积,即 $S_0 = \pi h^2/4$;膜片形成孔的截面积 S 仅仅是膜瓣打开角度 θ 的函数,即 $S = S(\theta)$,可以得到:

$$S(\theta) = S_0 (1 - \cos\theta)^2 \quad (3)$$

驱动气体下泄方程和活塞运动方程可表示为^[1,12]:

$$\frac{dm_{HA}}{dt} = -\rho_{HA} \sqrt{\frac{\gamma_{HA} p_{HA}}{\rho_{HA}}} \left(\frac{2}{\gamma_{HA} + 1} \right)^{\frac{\gamma_{HA} + 1}{2(\gamma_{HA} - 1)}} S(\theta) \quad (4)$$

$$M_p \frac{d^2 x}{dt^2} = (p_{HA} - p_A) \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) - f \quad (5)$$

式中, m_{HA} 、 ρ_{HA} 、 p_{HA} 和 γ_{HA} 分别为驱动气体的质量、密度、压力和比热比, M_p 为活塞质量, x 为活塞位移, p_A 为活塞后脸所受压力, D 为压缩管直径, f 为摩擦力。联立式(1)、(3)、(4)和(5),就完成了对膜片打开过程对活塞运动影响的刻画。

为便于研究,引入无量纲时间 $\tau = (t \times a_{A,0})/D$ 、无量纲位移 $\xi = (L - x)/D$ 、活塞马赫数 $\phi = u_p/a_{A,0}$ 和驱动气体下泄质量比 $\mu = m_{HA}/m_{HA,r}$,其中, u_p 表示活塞沿 x 方向的运动速度, $a_{A,0}$ 为活塞运动初始时刻空气的声速, L 为压缩管长度,对式(1)、(3)、(4)和(5)进行无量纲化,可得到如下简化方程:

$$\begin{cases} \frac{d\phi}{dt} = b_3 - b_4 \left(\frac{\mu}{\xi} \right)^{\gamma_{HA}} - f_1 \\ \frac{d\xi}{dt} = -\phi \\ \frac{d\mu}{dt} = -b_5 \left(\frac{\mu}{\xi} \right)^{\frac{\gamma_{HA}+1}{2}} (1 - \cos\theta)^2 \\ \frac{d^2\theta}{dt^2} = b_6 \left(\frac{\mu}{\xi} \right)^{\gamma_{HA}} \cos\theta \end{cases} \quad (6)$$

在上述方程组中: $b_3 = (b_1 \times p_{A,r}) / p_{A,0}$, $b_4 = b_1 b_2$,

$$b_5 = \left(\frac{2}{\gamma_{HA} + 1} \right)^{\frac{\gamma_{HA}+1}{2(\gamma_{HA}-1)}} \frac{a_{HA,0}}{a_{A,0}} \left(\frac{L}{D} \right)^{\frac{\gamma_{HA}-1}{2}} \left[\frac{h(1 - \cos\theta)}{D} \right]^2,$$

$$b_6 = \frac{4p_{HA,r}}{\rho_d h \tau w} \left(\frac{D}{a_{A,0}} \right)^2 (\xi_r)^{\gamma_{HA}}, \text{ 无量纲摩擦力 } f_1 =$$

$$\frac{v\bar{\omega} b_1 b_2}{\xi^{\gamma_{HA}}}; \text{ 而 } b_1 = \frac{\pi}{4} \frac{p_{A,0} D^3}{M_p a_{A,0}^2}, b_2 = \frac{p_{HA,0}}{p_{A,0}} \left(\frac{L}{D} \right)^{\gamma_{HA}}, a_{HA,0}$$

为活塞运动初始时刻的驱动气体速度, v 为摩擦系数, $\bar{\omega}$ 为活塞密封圈接触面积与压缩管截面积之比。

若膜片为瞬态打开,在方程组(6)中令 $\theta = 0$ 即可,这可视为方程组(6)的简化。但膜片打开动态过程对活塞末端运动的作用直接影响着自由活塞风洞的运行实践,而简化方程组无法对此进行刻画,方程组(6)的应用价值更加凸显。

3 数值结果

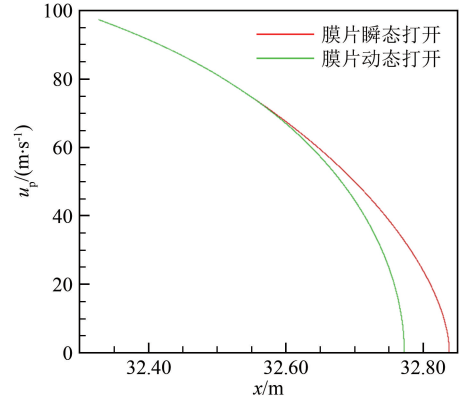
方程组(6)具有很强的非线性,不易获得解析解,需要通过数值方法加以研究。算例中,压缩管长度 L 为 33.372 m,直径 D 为 0.55 m,激波管直径为 0.15 m,活塞质量 M_p 为 200 kg;膜片材质为不锈钢,膜片厚度 w 为 4.0 cm;驱动气体为氦/氩混合气体,体积比为 7:3,初始压力为 19.0 kPa;高压空气压力 0.65 MPa。

图2显示了膜片动态打开和瞬态打开情况下活塞速度和驱动气体压力2个重要参数的差异。从图中可以看到,在两种情况下,活塞均可以充分减速;但膜片动态打开过程在一定程度上减小了驱动气体下泄速率,对活塞减速有利,其代价是驱动气体压力(无量纲)上升更快,常压力驱动时间(驱动气体压力峰值下浮 10%所需的时间)将减小。在该算例中,膜瓣从 0° 打开至 75° 用时接近 1.2 ms。若膜片打开速度增加一倍,活塞减速将变缓(但并不明显),而驱动气体无量纲压力峰值将明显降低,具体细节见图3。

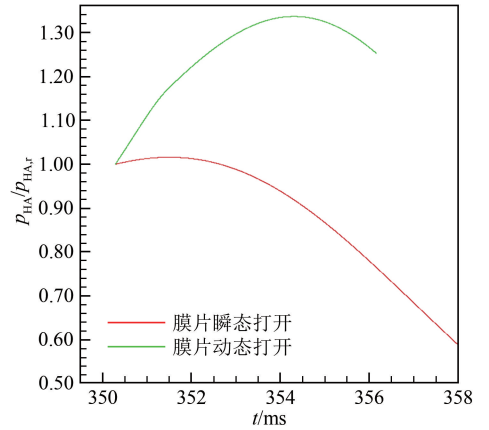
实际运行中,由于膜片材料和痕道刻划的差异,即使在相同运行状态下,同一批次的膜片也未必能够精确地在某个固定压力下打开,而且膜片最终张开的几何形状也存在差别。膜片打开时间的提前或者滞

后,对驱动气体状态和活塞运动都将产生影响。

基于方程组(6),可以从理论上分析膜片提前(或者滞后)打开所带来的影响。图4比较了压缩比 λ 为 30 和 40 的情况下活塞速度和驱动气体压力的变化。相对于 $\lambda = 40$ 的情况而言,膜片在 $\lambda = 30$ 时打开可视作“提前”。从图4可以看到,当膜片提前打开时,活塞仍然能够充分减速,但减速距离稍长。膜片提前打



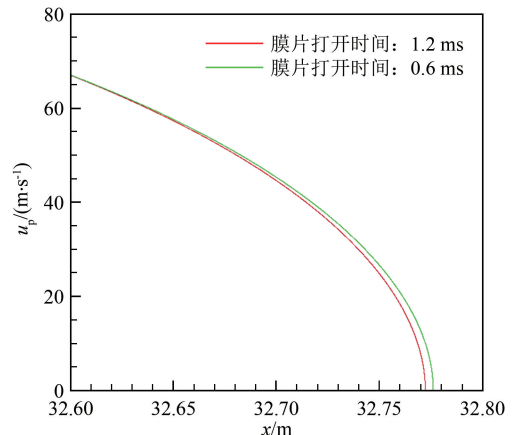
(a) 活塞速度与位置的关系



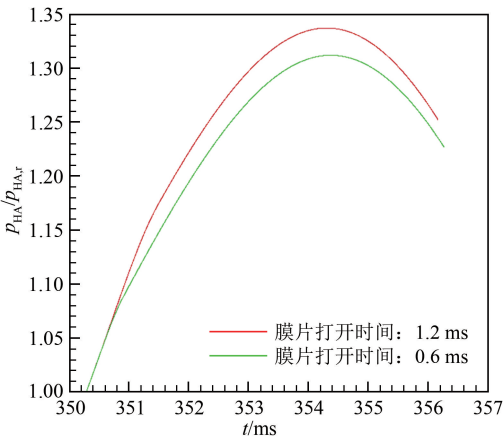
(b) 驱动气体无量纲压力和时间的关系

图2 膜片动态打开/瞬态打开情况下的活塞速度和驱动气体压力 ($\lambda = 40$)

Fig.2 Piston speed and pressure in two cases ($\lambda = 40$)



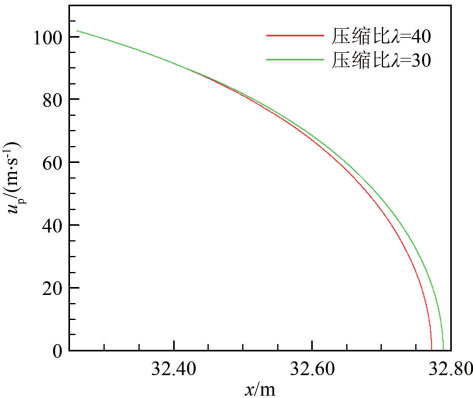
(a) 活塞速度与位置的关系



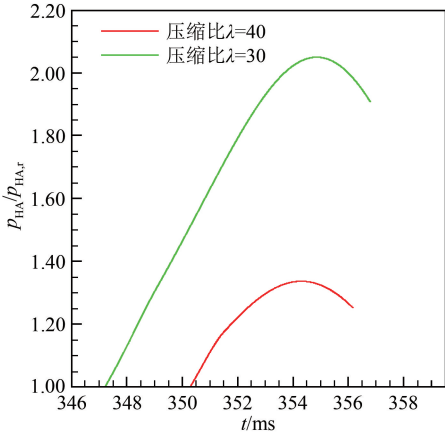
(b) 驱动气体无量纲压力和时间关系

图3 膜片不同打开速度(或时间)下的活塞速度和驱动气体压力(λ=40)

Fig.3 Piston speed and pressure under different rupture of diaphragm (λ=40)



(a) 活塞速度与位置的关系



(b) 驱动气体无量纲压力和时间关系

图4 膜片正常/提前打开情况下的活塞速度和驱动气体压力(压缩比40、30)

Fig.4 Piston speed and driver gas pressure with different compression ratios

开使得驱动气体压力增长相当明显而且陡峭(这意味着常压力驱动时间的减少)。理论计算进一步显示:在λ为30和40情况下,当膜片刚出现缝隙时,驱动气体压力分别为5.51和8.90 MPa;但随着活塞进一步压缩,两种情况下的驱动气体峰值压力相当接近,

分别为11.55和11.82 MPa。结合图3和4,可以看出膜片动态打开过程将在一定程度上弱化膜片提前打开所带来的不利影响。

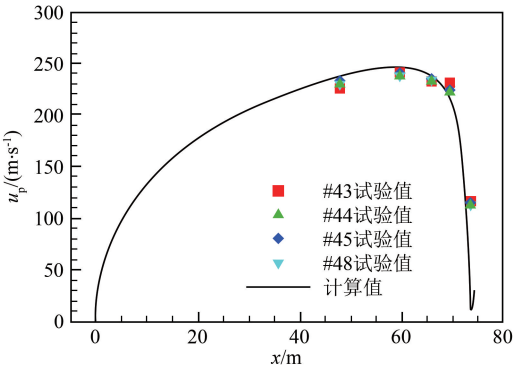
4 试验结果

在自由活塞激波风洞FD-21中开展相关试验,进一步研究膜片打开过程中非理想行为对激波形成和行进的影响规律。压缩管中布置的光电传感器可以实时准确地捕捉活塞轨迹和速度信息^[14]。图5(a)对比了活塞速度理论预测值和风洞4个车次的试验测量值(4个车次的初始条件见表1),两者之间相差小于5%,且活塞末端速度理论预测值更加贴合实际测量值。在4个车次中,活塞均可实现“软着陆”,这进一步证实了理论分析的结果,验证了方程组(6)的合理性。图5(b)展示了4个车次膜片打开后的情况,这也意味着膜片打开过程中非理想行为具有一定的频度。

表1 风洞试验初始条件及相关参数

Table 1 Initial conditions and related parameters of wind tunnel tests

$p_{A,0}$ /MPa	$p_{HA,0}$ /kPa	$m_{He} : m_{Ar}$	M_p /kg	λ	U_{max} /(m·s ⁻¹)	$p_{HA,r}$ /MPa
0.83	19	0.05 : 0.95	205	29	240	5.2



(a) 活塞速度与位置的关系



(b) 各车次膜片打开情况

图5 FD-21风洞重活塞速度历程及膜片打开情况

Fig.5 Velocity history of piston and diaphragms in FD-21

由于 FD-21 风洞膜片夹持机构的结构限制,无法采用常规流场显示技术获取激波的形成和演化过程。在试验中,依靠激波管管壁布置的压力传感器数据计算激波马赫数,以此间接获取激波形成和行进的信息。换言之,激波马赫数差异是膜片打开非理想行为带来的直接结果。图 6 展示了 4 个车次中激波马赫数 Ma 随位置的变化。可以看到:膜片打开行为的差异对早期激波马赫数影响较大,但这一影响在激波行进过程中逐渐式微,在激波管末端,4 个车次的激波马赫数差异不足 5%。因此,在相同的运行参数下,膜片打开过程的差异不会对风洞贮室条件带来明显影响。早期激波马赫数的差异暗示了膜片打开行为的差异对激波形成的复杂影响。保持适当的激波管长度,可以有效抑制膜片非理想打开行为的不利影响。

图 6 显示激波马赫数峰值所在位置非常一致。由于压力传感器位置固定,无法准确区分不同车次的激波形成距离(激波马赫数达到峰值时所对应的位移)。一个初步的结论是:这 4 个车次的激波形成距离偏差不会超过 2.5 m。

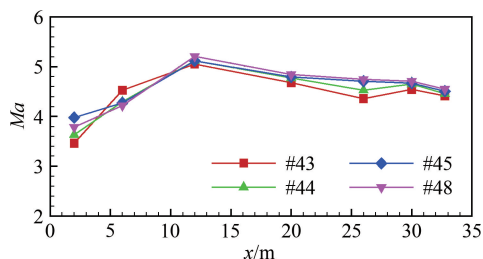


图 6 激波马赫数与位移

Fig.6 Mach number and displacement of shock waves

5 结 论

(1) 基于膜片的剪切-应变模型和活塞动力学模型,得到了膜片打开-活塞运动的耦合方程组,刻画了膜片非理想打开行为对活塞运动和常压力驱动时间影响。

(2) 在相同运行参数下,膜片非理想打开行为对活塞末端速度影响不大;在风洞缓冲装置附近,活塞可达到安全速度,不会对设备造成损伤。膜片非理想打开行为对无量纲驱动气体压力和常压力驱动时间影响较大。

(3) 膜片非理想打开行为对激波形成的影响较大,但是随着激波的传播,这种影响逐渐变弱,因此不会对贮室状态产生明显影响。

参考文献:

- [1] GAI S L. Free piston shock tunnels: developments and capabilities [J]. Progress in Aerospace Science, 1992, 29 (1): 1-41.
- [2] STALKER R J. Modern developments in hypersonic wind tunnels[J]. Aeronautical Journal, 2006, 110 (1103): 21-39.
- [3] HORNING H G. Ground testing for hypervelocity flow, capabilities and limitations[R]. RTO-EN-AVT-186, 2010.
- [4] HENSHALL B D. On some aspects of the use of shock tubes in aerodynamics research [R]. Aeronautical Research Council Technical Report 3044, 1957.
- [5] HICKMAN R S, FARRAR L C, KYSER J B, et al. Behavior of burst diaphragms in shock tubes[J]. Physics of Fluids, 1975, 18(10): 1249-1252.
- [6] OUTA E, TAJIMA K, HAYAKAWA K. Shock tube flow influence by diaphragm opening(two-dimensional flow near the diaphragm)[C]//Proc of the 10th International Symposium on Shock Wave and Shock Tube, 1975.
- [7] PETRIE-REPAR P J. Numerical simulation of diaphragm rupture[D]. Queensland: University of Queensland, 1997.
- [8] MIZUNO H, SAWADA K, SASOH A. Numerical study of non-ideal diaphragm rupture in expansion tube[R]. AIAA-2002-0650, 2002.
- [9] TANNON H, ITOH K, KOMURO T, et al. Experimental study on the tuned operation of a free piston driver[J]. Shock Waves, 2000, 10(1): 1-7.
- [10] ROTHKOPF E M, LOW W. Diaphragm opening process in shock tubes[J]. Physics of Fluids, 1974, 17(6): 1169-1173.
- [11] DREWRY J E, WALENTA Z A. Determination of diaphragm opening-times and use of diaphragm particle traps in a hypersonic shock tube[R]. UTIAS Technical Note No.90, 1965.
- [12] HORNING H G. The piston motion in a free-piston driver for shock tubes and tunnels[R]. GALCIT Report FM 88-1, 1988.
- [13] 朱浩, 沈清, 宫建. 自由活塞激波风洞定压驱动时间研究[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(1): 45-50, 56.
ZHU H, SHEN Q, GONG J. The constant time of piston driver in free piston shock tunnel [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014, 32(1): 45-50, 56.
- [14] ZHANG B B, ZHU H, SHEN J M, et al. Experimental study of the compression process in a free piston shock tunnel FD-21 [C]//Proc of the 8th International Conference on Fluid Mechanics (ICFM8), 2018.

作者简介:



朱 浩(1977-),男,江苏邳州人,博士,高级工程师。研究方向:高超声速空气动力学。通信地址:北京市丰台区云岗西路 17 号 7201 信箱 39 分箱(100074)。E-mail: zhuhaol977@hotmail.com