

激波管标定技术中的一些基本问题

范良藻 俞鸿儒¹⁾

(中国科学院力学研究所)

众所周知,在阶跃突加载荷的情况下,很多材料的弛豫时间是足够短——例如只有几个微秒,甚至几十个毫微秒,因此,如果我们能在一个有限的物理空间内,创造一个持续时间只有毫秒量级的压力和温度环境,那么不仅我们可以观察到材料的动态过渡过程,还可以看到过渡过程结束后的准静态过程,只要我们能在这样短的时间内记录下所需要的参数。对有些静态试验而言,这不仅是一个方便的补充,还可以通过动静态试验对比,取得某些额外的讯息,有时,这对问题的深入了解是有价值的。何况激波管技术所能提供的压力、温度、气流速度的范围相当宽,更使这门技术为各种科学研究和工程发展提供诱人的前景。

从表面看,激波管是一种基于气体动力学原理的设备。其应用范围遍及科学技术的众多领域。从国外报刊上经常可以看到“冲激波传遍全球”这样的用语来描写一件爆炸性的新闻,这是不奇怪的,凡是看过 Glass 写的《激波和人类》这本书的人都能理解到,从自然界的生命起源到当今人类命运的去向都和巨大爆炸必相伴随的激波有着不可分割的联系。可是激波管作为一种技术之普遍兴起,还是发生在第二次世界大战前后,这是由于核爆炸和航空、航天两大技术领域研究的刺激而引起的。

从世界范围内看,几乎没有一个工业部门和应用技术科学没有或多或少、或前或后采用激波管技术的。也许我们可以对研究工程师说这样一句看来是夸大的话:“你有什么困难需要克服?那就不妨想一想,激波管技术能否为你提供一点帮助”。

我们这篇文章只不过想把我们多年来在这方面的实验工作中的经验整理出来,使初步接触激波管技术的同人能少走一点弯路,如果还能说出一点道理,那么对这方面专家来说算是一种交流或讨论。我们将把在图 1 所示的台式袖珍激波管中获得的实验结果来说明某些问题。

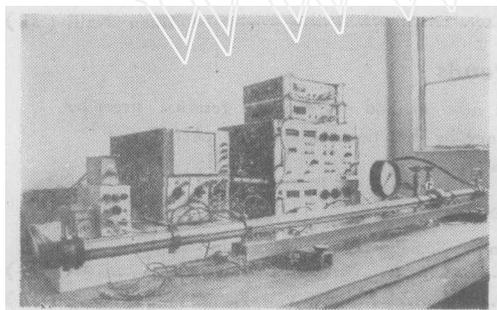


图 1 台式袖珍激波管²⁾

一、破膜的速度与激波的形成

如果破膜是瞬时的,那么在膜片处将有一束黎曼波从夹膜处出发。向下游传播的激波瞬时形成。事实上,破膜不可能是瞬时的,总之小扰动发生在前,大扰动追赶在后。最后形成稳定的激波总需要一个形成距离 x_f 。

为了把问题简化,可以把破膜过程看成是一个照相机光圈不断扩大的一个过程。所以破膜一开始,必然是一束尖细的射流由膜片的小孔射出。随着“光圈”增大,射流由尖变粗,并同时运动

- 1) 参加此项实验研究工作的还有陆超颖同志。
- 2) 此项产品已定型生产,需用者可向作者联系。

中不断膨胀。这时在射流更前一些运动的激波一开始也不可能是一维的,随着在管壁上不断发生的马赫反射,最后形成一维向前运动的激波。从这样一个物理图象出发,当然高马赫数激波的形成距离就要比低马赫数形成距离要长。总之不管是弱激波还是强激波均存在一个特征长度 x_j ,在这段距离上激波形成并加速,最后达到最高的稳定速度。

不少研究者对此进行了分析及实验研究,研究结果并不完全一致。但其共同的结论是:激波形成距离与有效开膜时间(不是全部开膜时间)及最大激波速度成正比。而有效开膜时间

$$\tau_0 \propto D \left(\frac{\rho_l}{\Delta P} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式(1)中的 D 是管子的水力学直径, ρ_l 是膜片材料密度, $\Delta P = P_2 - P_1$ 为膜片两边压差。总之,激波形成距离近似地与管径,最大激波速度成正比。当然还与膜片的具体材料有关。

对一般既定的激波管而言,在使用过程中首先应该注意膜片质量的选择,起码要求破膜压力稳定,另外如果破膜时间过长,又有碎片飞击,顺流而下,那么不仅激波一时形成不了,而且会影响波形质量。

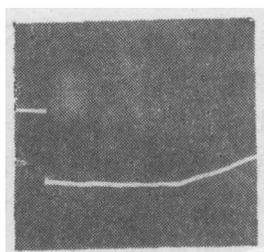


图 2

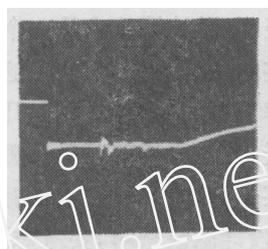


图 3

图 2 及图 3 是 KL-i 型压电晶体传感器在激波顶盖测出的反射激波波后的压力波形。图 3 所示的波形质量不佳就是因为膜片在破裂时有碎片顺流而下产生的干扰所造成,用退火纯铝作膜片一般可获得良好的结果。

用标定激波管标定传感器的灵敏度,总是期望多次标定出来的灵敏度的分散性尽可能地小一些,用激波管标定 Kistler 603 B 传感器所得的灵敏度和其静标给出的数值非常接近。但是如果膜片质量欠佳,不仅波形质量不好,而且每次标定所得“动态”灵敏度分散性很大,并和静标数据有较大的偏差。采用好的膜片,这种现象就消失了。这一点希望引起特别注意。

二、激波管的尺寸与精粗

一般讲,低 M_j 数时,激波形成距离较短,每米管长的试验时间较长,所以低 M 数的激波管可以设计得短一些。但是目前我们也看到某种倾向,喜欢把激波管设计得更长一些,更粗一点,内表面光洁度加工得更高一点等等,结果一种本来可以投资少,占地小,效率高的试验装备,往往却加工成一个庞然大物,这是和激波管技术的特征相违背的。当然不存在一个万能的激波管,必须根据具体要求来设计。因此从设计思想上讲,激波管应是一项专用设备,这样才有利于发挥激波管技术的特殊功能。

比如说,设计一个用来标定传感器动态性能的标定激波管,目前我们设计使用的这台 $\phi 24 \times 2000$ 的袖珍台式激波管是不是可以更细一点,更短一点呢? 这需作具体分析。

目前我们管子的长度为 $60d$ (d 为管内径),如果在低 M 数情况下使用 $x_j \approx 4d$,那么管长再缩短一倍是不是也就可以了(当然同时管径也按比例缩小)。但是如果马赫数过高,或是膜片质量不

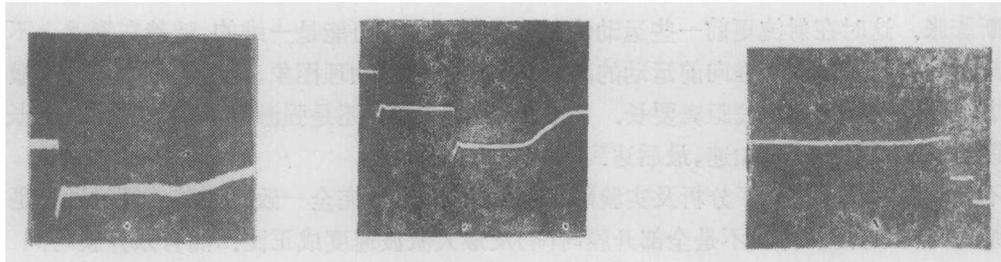


图4 距膜片 18 厘米处的 $P_2(t)$ 曲线

图5 距尾端顶盖 22 厘米处的 $P_2(t)$ 曲线

图6 距尾端顶盖 2 厘米处的 $P_2(t)$ 曲线

佳使得破膜时间过长,即使管长不缩短,那么在管子终端,激波可能还未很好地形成。

我们在距膜片下游 18 厘米处侧壁安装一支测速传感器,然后每隔 20 厘米沿下游方向再安装一支测速传感器来记录激波的走时。各点的压力波形表明,2 区的压力平台 $P_2(t)$ 直到距离终端 2 个厘米处才出现(见图 4、5、6),这说明我们膜片的破裂情况不很理想,所以形成稳定的激波距离较长。所以作为标定激波管,马赫数 M_0 应选用小一点为好。

这一情况表明,激波管技术是一个综合性很强的“兵种”,为解决为各种不同目的设计的激波管可能出现的实际情况,需要我们在这一方面逐步积累起比较丰富的经验。

对自振频率很低的传感器(例如几千周),同时阻尼比又不大,这样传感器对阶跃压力反应的过渡时间比较长,在这种情况下采用激波管标定是不太合适了。最好采用其他途径。

所以针对某一具体目的而设计的激波管都有一个最佳尺寸问题。对一个要开展发展研究的实验室来说,在设计激波管时,要考虑到用途的多样性。然而为了加工方便,设计用途较窄的专用激波管有时反而是适宜的。

对激波形成而言,形成距离基本上与管内径成比例。那么能不能因为这一点,激波管的长度和直径就可以按比例缩小或放大呢?即存在不存在一个模型律的问题?由于声速的大小与激波管的几何尺寸无关,破膜时间还与其他因素有关。另外,管径细了,边界层影响增加,因此目前还没有公认模型律。所以对于为一具体目的设计的激波管都会有一个最佳尺寸与临界尺寸。这就要求我们对激波的形成,激波的等速运动以及激波的衰减有哪些控制因素,应有较透彻的了解。因此,不定常激波的边界层研究就显得特别重要。一般说来,试验时间要长,须用长管。为了避免过分衰减,管子就得加粗。如果 M_0 数小,试验时间要求亦不长,管子就可以设计得短一些。

一般说来,激波管的内表面光滑点好,以免增加流阻,或对流场发生干扰。不过亦应适可而止。如果一定要求内表面加工得象镜面一样平整,那么这种非标准加工投资将十倍增加,这不是经常必要的。

在 M_0 低到 1.1 以下时,大家都认为是层流运动。为什么有时不同马赫数标定出来的传感器灵敏度出现不一致的情况?美国人一般取 $M_0 \approx 1.3$ 来标定传感器,我们倾向用 $M_0 \approx 1.4$,这可能是具体所使用的激波管的尺寸大小不一样的缘故。

诚然,从激波压力测得的波形看,管子内部不平整——尤其在接口处稍微低凹或稍微高凸——对波形的形状是敏感的,好在激波是一个稳定性很强的非线性波,它在受干扰以后,总是有在运动中把这种干扰纠正过来的倾向,因为缓波变陡,或者说大扰动总是要赶上小扰动这是大多数气体介质的属性。所以,激波形成段和试验段加工应当精一点外,其余部份,尤其是高压段要求就不必过高。在能达到试验要求的目的这一前提下,在设计激波管时,倒是首先应该考虑,能否更短一点,更细一点。如果这么作是可行的,我们将赢得时间。

• 4 •

三、热效应

激波管技术一般可以向我们提供三项可供试验的项目：阶跃压力平台；高速气流；高温气体。假定空气比热比为 1.4，根据

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{(4M_1^2 - 1)(M_1^2 + 2)}{9M_1^2}, \quad (2)$$

可以看出，即使 $M_1 = 1.2$ ，反射激波波后气体的温度将上升摄氏一百多度。 $M_1 = 4$ 时， T_2 将高达 2000°C 。由于整个过程持续时间很短，一般只有几个毫秒。所以在一瞬热风过后，激波管的温度是不会有可察觉的变化。但是切切注意，时间长短是相对而言的，在这“短暂”时刻，热辐射、热传导这些能量交换过程一定照常进行。否则我们就会对在试验中必然会出现的温度效应得不到应有的解释。

以电气石压电晶片这一热敏元件而言，温度骤升一度，由热弹性给出的热电讯号相当七个大气压阶跃压力给出的压电讯号。即温度上升一度热膨胀所产生的应变相当用七个大气压所产生的压应变才能抵消。可见热应力经常是很大的。对此若是注意不够，甚至会使元件拉破。例如在用环氧树脂粘接材料时，如果不考虑不同材料热膨胀系数之间可以有巨大的差别，就会出现材料被剪裂的情况。

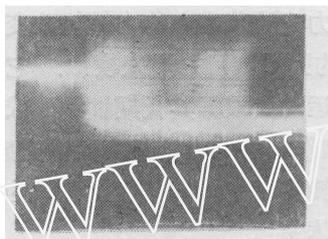


图7 PVDF 薄膜传感器在激波管 5 区的 $P_2(t)$ 曲线(涂硅脂绝热)



图8 PVDF 薄膜传感器在激波管 5 区的 $P_2(t)$ 曲线所呈现的温度效应

虽然石英晶体压电系数的温度灵敏度很小(所以一般情况下传感器都选用它作压敏元件)，但是在瞬态受热交换过程中，总会有温度梯度，由此产生的应力不均匀——内应力会使敏感元件受拉、压、剪，尤其剪切会经常出现，照样会引起热讯号。所以在测量过程中，要经常注意热屏蔽。好在加温是瞬时的，所以作到这一点并不难，有时只要在感受面上敷上一薄层硅脂就解决了。

图 7、图 8 是两幅有无热屏蔽的热敏元件 (PVDF 压电薄膜) 给出的压力波形。可见热讯号影响之大。因为 PVDF 同时也是一个热敏元件。

四、激波管内部不平度和传感器的安装

激波管内的激波是一个前沿十分陡峭的阶跃压力函数。对它进行富氏分析，内含有丰富的高频谱波，当其波长和管内不平度的尺度可相比拟时，就要发生绕射、反射等各类干扰，从而使这一阶跃函数发生各式各样的畸变，例如在阶跃波的平台出现鼓包或小坑。这对一个标定激波管而言是应该避免的。好在激波是一个非常顽强要表现自己特性的非线性波，受干扰后，往前运动一段，最后又能自动地将这些干扰去掉，所以激波管内光洁度也好，不平度也好，最后只是在试验段某一段要求比较高，并同时要求测量压力波形的传感器在激波管内的安装要和内表面密接平整。

(下转第 9 页)

除腾空运动以外, Ghosh^[6] 分析运动员在单杠上的振浪运动。人体的运动被限制为平面运动,而简化为在肩关节和髋关节处以圆柱铰联结的三刚体系统,握杠的手亦视作圆柱铰,计算其最优运动过程。Белецкий^[5] 系统地研究人的步行运动。为了获得最基本的运动规律,他忽略手臂的摆动,将上身合并为一个刚体,支承在忽略质量的下肢上。在预先规定的运动学条件限制下(足迹宽度不变,支承点作匀速直线运动等),寻求动力学方程组的周期解,以考察步行过程中人体的晃动规律。进而以最小能量消耗为指标,讨论步行运动的最优化问题。

五、结 语

以上叙述的人体力学模型可以将复杂的运动生物力学问题简化至经典力学的范畴以内,从而有可能利用精确的数学工具进行研究。尽管这种简化方法原则上可用来分析各种运动项目,但具体进行分析时往往面临巨大的数学困难,以致完全成功的例子在文献中尚不很多。因此还须对这个新学科领域投入更多的努力,不断在实践中改进,力求建立起能充分反映人体运动的基本特征又便于采用现代化电子计算技术的力学模型,以推动运动生物力学的发展。

参 考 文 献

- [1] Hanavan, E. P., A Mathematical Model of the Human Body, AD 608463 (1964).
- [2] Smith, P. G., Kane, T. R., *J. Appl. Mech.*, **35**, 1(1968), 167—168.
- [3] Kane, T. R., Scher, M. P., *Int. Solids Structures*, **5**, 7(1969), 663—670.
- [4] Kane, T. R., Headrick, M. R., Yatteau, J. D., *J. Biomechanics*, **5**(1972), 313—320.
- [5] Белецкий, В. В. Динамика двуногой ходьбы, *Изв. АН СССР, МТИ*, 3—4 (1975).
- [6] Ghosh, T. K., Boykin, W. H., Dynamics of the Human Kip-up Maneuver, *Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement, Control*, **97**, 2(1975), 196—201.
- [7] Huston, R. L., Hessel, R. E., Winget, J. M., Dynamics of a Crash Victim—A Finite Segement Model, *AIAA J.*, **14**, 2 (1976), 173—176.
- [8] Wittenburg, J., *Dynamics of System of Rigid Bodies*, Teubner (1977).
- [9] Dapena, J., Simulation of Modified Human Airborne Movements, *J. Biomechanics*, **14**, 2(1981), 81—89.
- [10] 刘延柱,人体空翻转体运动的动力学,全国第二届运动生物力学会议论文集(1981).
- [11] 刘延柱,自由下落猫的转体运动,力学学报, **4**(1982), 388—393.

(上接第5页)

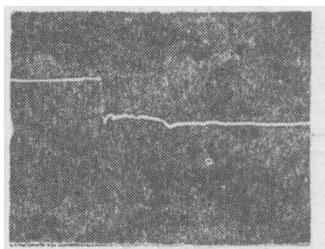


图9 由于安装不平整所引起的阶跃压力的畸变

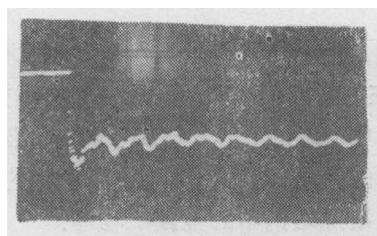


图10 由于安装不平整引起的低频自激对阶跃压力的严重干扰

在5区端盖上应平整安装的传感器,表面如果高于端盖平面0.1mm,波头附近的平台上就会出现一个鼓包,见图9。当然在传感器或记录仪器频响很低时,这些变异的细致部分会被滤掉。

如果将传感器安装得比端盖平面低2个mm,在受压面形成一个内陷的平坑,这时波形大变,会引起一个低频的自激,看上去好象传感器的自振频率变低了。其实这个“变低了”的频率是传感器测出的内陷平坑这一谐振的自振。

传感器安装平整时波形就非常理想(图2)。