

介紹激波管

潘良儒

(中国科学院力学研究所)

一 引言

航空的發展不过是本世紀开端以来的事，年輕的航空技术成長很快，大約每十年就有一次划时代的进步。飞机已突破音速障碍而發展到超音速，有些先进国家正試造兩倍音速的飞机(即飞行馬赫数为 2 的飞机)。由于火箭及飞机等的速度愈来愈高，新的現象与困难也不断地产生。例如在高速飞行中，由于高速空气的动能在机身表面附近很薄的一層轉变为热能，使飞机表面發高热：在兩倍音速飞行时，机表面的温度已达 300°C 左右，而且机表面温度的增加是与飞行馬赫数的平方成正比的，所以更进一步提高飞行的速度，就遭到了高温阻碍。我們除了要寻找耐高温的材料外，还要設法减少产热量及冷却發热部分，为了能找出这些办法，我們就要了解这問題的一切根源。在高温中气体分子分裂为原子，原子又变成离子，因此，流体力学加上了分裂与电离的作用另成了一門新學問，叫电磁流体力学。复杂的流体力学再加上这两种新現象，使高速飞行的問題更加复杂。近十年来許多科学家用激波管来探寻气体在高温中的分离与电离的基本規律及其他有关原子物理学的問題。化学家用它来研究燃燒爆震及在高温中的气体化学变化。激波管也很可能給化学制造工業开辟一条新道路。根据近年来研究的成果，已經証明激波管是空气动力学研究不定常流唯一的工具。

除了上述功用外，激波管还可以代替風洞。我們知道为了研究飞机在飞行中的現象，最好的一个办法是把一个小飞机模型放在人造的均匀流場里来实验，这就是風洞的作用。随着航空的突飞猛进，風洞也愈来愈大，有的大風洞只是用来推动空气流动所耗的功率，就已达 200,000 千瓦。由于激波管不消耗大量的能，所以科学家正力求改善激波管現有的缺点。使其能完全代替風洞的作用。由于它的構造簡單及广泛的功用，在我們物質条件水平还差的今天，它將是一种很重要的研究工具。本文的目的是来介紹这对我們还是陌生的激波管，作为科学工作者的参考。

激波管并不是什么新东西，它几乎同風洞一样古老。1899 年法国威利 (Vieille) 發明用激波管来研究火焰波与爆炸波的傳播速度，虽然他的实验很成功，然而一直到后来 1931 年到 1943 年的期間，英国的培門 (Payman) 同雪佛德 (Shepherd) 等才把这遺忘了四十余年的激波管帶到研究室里来，用它来研究爆炸波及激波的現象，并进一步改进激波管。近十年来激波管的發展是很迅速的，很多科学先进国家已广泛地应用激波管来作研究了。

二 什么是激波及稀疏波

为了要解释激波管，首先要解释激波，我们可以用日常生活上的例子来说明它。大家知道空气的某一点如果发生轻微的压力变化，这种变化就会以声速传播出去；可是假设在静止的空气某一点或小的体积内，压力突然发生剧烈的变化，例如爆炸，则压力波传播的速度比音速快，其快慢根据爆炸的强弱而定。这种波的特点是当波前到达某一球面时，在该球面上气体的物理性质发生剧烈变化，而其波前不到的地方，空气不受到任何影响。波后面的压力与密度比静止的空气压力及密度高，波后面的粒子也流动起来。这样的波我们叫它为激波，或更准确一点叫前进激波，我们也叫激波为压缩波。还有另外一种激波，是我们日常生活中不容易觉察到的，譬如一个圆锥形的子弹以超音速在空气中飞行时，在它的前面就有一激波。为了证明这一点，我们可以把子弹头放在超音速的风洞里，用特种照像法可得如图 1 所示的激波现象。普通我们假设激波是没有厚度的，严格说起来空气的分子不可能在没有厚度的面上就完成突然的变化，换言之激波是有厚度的，分子的突变是在相当于分子的平均自由路程的厚度内完成的。在通常的情形下，分子的平均自由路程很小，所以在运算上假设激波为一物理性质不连续的面，或称之为间断面。第一个计算激波前后物理态关系的是黎曼 (Riemann)，但是他犯了理论上的错误，经兰肯 (Rankine) 及雨果里阿 (Hugoriot) 各自独立的改正后，便得到下面计算激波的公式：设激波静止，又设 P_1, ρ_1, T_1 及 M_1 代表激波前的压力、密度、温度及马赫数， P_2, ρ_2, T_2 及 M_2 为激波后面的压力、密度、温度及马赫数， γ 为气体的等压比热与等体积比热之比，则：

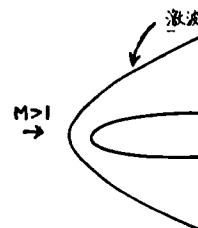


图 1

$$M_2^2 = \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2}{\gamma M_1^2 - \frac{\gamma-1}{2}}, \quad \frac{P_2}{P_1} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} M_1^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1}, \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma+1) M_1^2}{2 + (\gamma-1) M_1^2}.$$

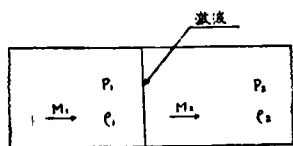
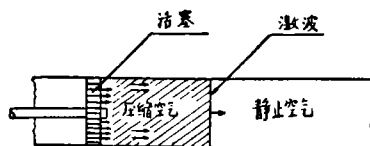


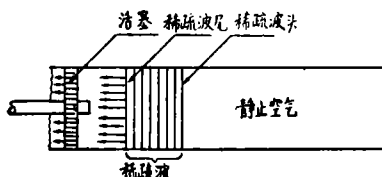
图 2

因为激波管流中也有稀疏波，除了说明激波外，还应该说明什么是稀疏波，让我们参看图 3 所示的两个实验：

设活塞在一长管中以某常速向右前进 (见图 3 a)，则产生一向右前进之激波。如前面所说，激波所到的区域内的空气受到压缩作用，并向右流动；



a. 活塞向右移动时，产生激波，并推动压缩空气向右流动



b. 活塞向左后退时，使空气膨胀，产生稀疏波

图 3

在激波前的空气維持靜止，不受任何影响。这实验进一步地解释了激波。相反地，若是我們使活塞向左以某常速后退，則产生如圖 3 b 所示的稀疏波。当活塞开始后退时，空气不是立刻就受到影响，仅仅是波头所到的区域内的空气受到影响。波头以音速向右前进，波头的空气粒子速度仍然为零，但开始受到稀疏波的加速作用。换言之，当稀疏波經過某一粒子时，它受到加速作用，愈接近波尾的粒子，其速度愈大，一直到波尾，粒子速度增加到同活塞后退的速度一样，同时不再有加速。在波尾与活塞間的粒子速度均与活塞后退速度一样。活塞后退超过某速度时（此速称为逃速），波尾与活塞間成真空，故前者叫不完全扩张，后者叫完全扩张。

三 激波管的原理

为了說明激波管的一般原理，讓我們来介紹一个最简单的例子，如圖 4 所示。激波管不过是一根長管子，兩端封閉，当中用薄膜把它分隔为高压室与低压室。普通兩室中均是空气，也有时用其他气体如氩、氦、氮、氧等。当薄膜被刺破时，因高压室与低压室的压力差而产生波动。我們先分析低压室發生的现象，这现象相当于活塞在管中前进：靠近薄膜的分子被压缩而形成激波（如圖 5 所示）以超音速沿低压室前进。在激波前面的物理状态（如圖 5 中所示(1)区），不受薄膜破裂影响。激波后面与接触面之間的气体（如 5 中所示(2)区）被压缩后获得一均匀流速。根据布朗脱定律，該处粒子速度与激波的相对速度是亞音的。接触面是原来高压室气体与低压室气体的分界面，也获得与上面流場一样的速度，其作用类似圖 3 中的活塞。我們再来分析高压室所發生的现象，此现象相当于活塞在管中后退。在高压室这边，薄膜附近产生稀疏波（如圖 5 所示 R ），稀疏波头以音速向左傳播，波头左面（圖 5 中(4)区）是未受扰动的高压气体，波的厚度决定于波前后的压力比。在稀疏波与接触面之間（圖 5 所示(3)区）的分子，已經过扩散程序，并获得一均匀流速，其粒子速度与(2)区的相等。由于接触面与稀疏波之間的气体經過扩张，其温度下降，接触面与激波之間的气体曾被压缩、其温度上升，故前者的温度比后者低。因此，前者的声速比后者低，结果是前者的馬赫数比后者的大。实验証明，根据上面簡單的波及均匀流場推算出来的結果很正确，茲列举其結果如下：

符号：

a = 声速， P = 压力， u = 粒子速度， w = 激波速度， x = 沿激波管与薄膜的距离， ρ = 密度， C_p = 等压比热， C_v = 等体积比热， M = 馬赫数， T = 温度， $E_{ij} = (C_v T)_i / (C_v T)_j$ (i, j 指激波管流中某流場中的物理态)， $M_i = u_i / a_i$ ， $P_{ij} = P_i / P_j$ ， $T_{ij} = T_i / T_j$ ， $u_{ij} = u_i / a_j$ ， $W_{ij} = w_i / a_j$ ， $\alpha_i = (\gamma_i + 1) / (\gamma_i - 1)$ ， $\beta_i = (\gamma_i - 1) / 2\gamma_i$ ， $\gamma = (C_p / C_v)$ ， $\Gamma_{ij} = \rho_i / \rho_j$ ， \vec{S} = 向右傳播的激波， \vec{R} = 向左傳播的稀疏波， \vec{C} = 向右傳播的接触面，

1. 激波强度 P_{21}

$$P_{14} = \frac{1}{P_{21}} \left[1 - (P_{21} - 1) \sqrt{\frac{\beta_4 E_{14}}{\alpha_1 P_{21} + 1}} \right]^{\frac{1}{\beta_4}}$$

$$\text{当 } P_{14} \text{ 很小时, } P_{21} \approx 1 + \frac{\alpha}{\beta_4 E_{14}}$$

2. 密度比

$$\Gamma_{34} = [P_{14} P_{21}]^{\frac{1}{\gamma_4}}$$

$$\Gamma_{21} = (1 + \alpha_1 P_{21}) / (\alpha_1 + P_{21})$$

3. 温度比

$$T_{34} = [P_{14} P_{21}]^{\beta_4}$$

$$T_{21} = \frac{P_{21}(\alpha_1 + P_{21})}{1 + \alpha_1 P_{21}}$$

4. 激波速或馬赫数

$$M_{11} = [\beta_1(1 + \alpha_1 P_{21})]^{\frac{1}{\alpha_1}}$$

5. 接触面或均匀流场的粒子速度

$$U_{34} = (1/\gamma_4 \beta_4) [1 - (P_{14} P_{21})^{\beta_4}]$$

6. 均匀流场的馬赫数

$$M_3 = (1/\beta_4 \gamma_4) [(P_{14} P_{21})^{-\beta_4} - 1]$$

$$M_2 = (P_{21} - 1) / \gamma_1 [\beta_1 P_{21} (\alpha_1 + P_{21})]^{\frac{1}{\alpha_1}}$$

7. 稀疏波的速度

波头 $C_{44} = -1$

波尾 $C_{34} = \frac{1}{\gamma_4 \beta_4} [1 - (P_{14} P_{21})^{-\beta_4}] - [P_{14} P_{21}]^{\beta_4}$

从上面的式子看来，只要测量在薄膜破裂前管内气体的物理态，我們就可以計算激波管流。为了更进一步說明它，下面再举一个实际的例子。設薄膜破裂前低压室的压力为 $P_1 = 100\text{mmHg}$ ，高压室的压力 $P_4 = 2000\text{mmHg}$ ，兩室的温度 $T_1 = T_4 = 288^\circ\text{K}$ ，在薄膜破裂后的 $1/100$ 秒时，其管流情形如圖 6—11 所示：

假如我們在低压室离开薄膜 ω 尺的地方开一玻璃窗口，用特別快速照像的方法，可以記錄薄膜破裂后連續發生的現象：

1. 首先是激波經過窗口向右前进。
2. 跟随激波后面的是均匀流場（圖 12 中的(2)区）。
3. 然后是一温度与密度間断的接触面。
4. 在接触面的后面是另一均匀流場（圖 12 的(3)区）。
5. 最后是从管子的左端反射回来的稀疏波。
6. 或右端反射回来的激波。

我們可以把上面的現象用时间与距薄膜的距离为坐标表示出来，即圖 12 所示：

圖 12 中所示(1)，(2)，(3)及(4)区的物理态，我們已經在前面說明过了，不再解釋。(5)区是反射激波与管右端間的区域，其温度較(2)区高，(6)区是反射稀疏波与管左端的区域，其温度較(3)区低，这两区域的气体是静止的。(6)区的物理态尚待更进一步的研究，过去多被忽略。

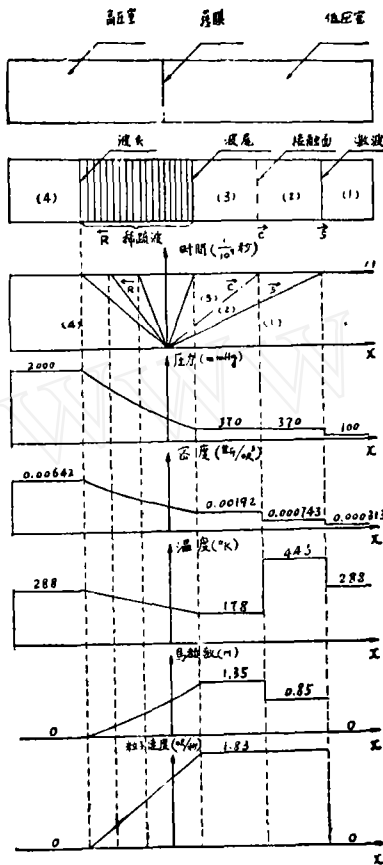


圖 4 激波管

圖 5 薄膜破裂后 1/100 秒时的管流

圖 6 激波、接觸面及稀疏波的時間與位置的關係

圖 7 在圖 5 指定的時間，管內壓力的情形。

圖 8 在圖 5 指定的時間，管內各點的密度

圖 9 在圖 5 指定的時間，管內各點的溫度

圖 10 在圖 5 指定的時間，管內各點的馬赫數

圖 11 在圖 5 指定的時間，各點粒子速度

四 激波管的用途

前面已說明激波管的一般原理，現在可以分六個主要方面來說明它的用途。

I. 代替風洞

在前節已提到激波管流中有兩短時間的均勻流場，一均勻流場在激波與接觸面之間（如圖 5 所示的(2)區），另一均勻流場在接觸面與稀疏波之間（圖 5 中(3)區），我們可以利用這兩臨時均勻流場來作為一個臨時風洞。這兩均勻流場各有其相反的特點：(2)區的特點是它的溫度高，馬赫數有最大限度的限制。如果起始時的壓力比 P_{41} 為無限大，氣體為空氣，則馬赫數為 1.73，也即是其可能的最大馬赫數。下面我們還要討論如何提高其馬赫數。(3)區的特點是溫度非常低，據理論推測，本區的馬赫數可以變到無限大。但用(3)區的均勻流場來代替風洞是有困難的，因為該區受薄膜破裂後破片的影響，可能不易變為均勻流場，此點尚待進一步的實驗。

假如我們利用激波與接觸面之間的均勻流場來作模型試驗，則下面四種波之一到達試驗

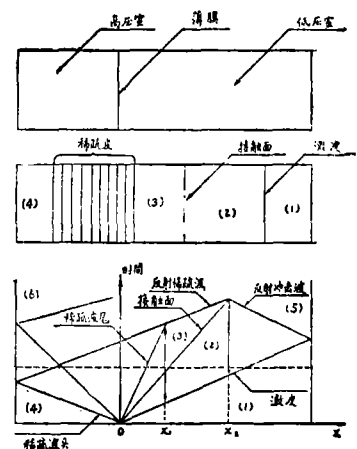


圖 12 以薄膜為原點所表示的時間與激波、反射激波、接觸面、稀疏波及反射稀疏波的位置的關係

区时，均匀流場便遭到破坏：(1)管壁反射波，(2)自管端反射回来的激波，(3)自管端反射回来的稀疏波及(4)接触面。普通用适当長的高压室及低压室，可以使所有的波同时到达模型处，这样便可以使均匀流場在模型处維持最久。參看圖 12 我們便知道應該把模型摆在 X_2 這一點上，因为該点維持均匀流速的时间最長，但是也不过是千分之几秒而已。同样的，如果我們利用(3)区均匀流場来代替風洞，能維持均匀流速最久的一点在 X_1 点，所以模型應該放在 X_1 点，但維持的时间也很短。所以用激波管来代替風洞就必须有很快测量的技术，因此，也就增加技术上的困难。第二个困难是：在如此快的情形下所量出来的結果，只是代表沒有附層面流的位流而已，因为附層面流来不及形成，然而实际上飞机在飞行中是有附層面流的，所以要用激波管来完全代替風洞，还得更进一步来研究。为了同風洞作一个全面性的比較，也应该談談激波管的优点：第一，它的構造比風洞簡單；第二，激波管不像風洞那样需要耗费頗大的空气压缩机，它要的只是普通裝在气罐里的压缩气体；第三，風洞常受冷凝結及气体液化的限制，但激波管較易于避免冷凝結及液化，而且由于用的气体少，也易于使少量气体干燥，而不致冷凝結；第四，激波管可以用来进行亞音、跨音及超音的实验。

II. 激波管是研究不定常流的惟一工具

近十年来不定常流的研究得到很大的成就，激波管是用来验证这方面理論的唯一好工具。因内容甚多，限于篇幅，不能一一列举，下面仅略述四个例子，其数学运算的过程与結果也从略。

1. 兩激波相撞：

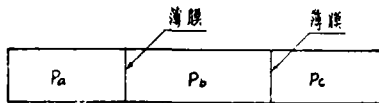


圖 13 一个具有三个压力室的激波管

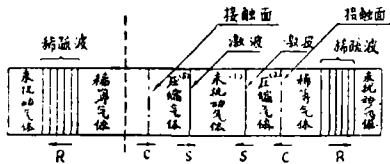


圖 14 中間一室的压力低于其他兩室，在兩薄膜同时破裂后某时的管流

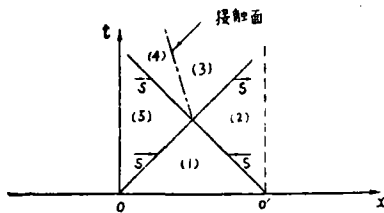


圖 15 兩激波在中間室相撞前后

如圖 13 所示，用兩薄膜將激波管分隔成三室，并使其中間一室的压力低于其他兩室的压力，即 $P_a > P_b < P_c$ 。若同时刺破兩薄膜，則产生兩激波，并在中間室相对前进如圖 14 及 15 所示。兩波相撞后另产生兩反射激波，在兩反射激波后面产生兩温度不同的均匀流場，密度也降低，(參看圖 15 中(3)及(4)区)，在这兩均匀流場之間，有一接触面。設 P_a 及 P_c 相等，則(3)区及(4)区相同，接触面消失，其結果同激波打击在固

体壁上一样。

2. 激波与稀疏波相撞:

假若使中间一室气压低于左端一室, 同时又高于右端一室, 即 $P_a > P_b > P_c$, 在同时刺破两薄膜时, 一激波自左边薄膜处开始沿中压室向右传播, 同时一稀疏波自右边薄膜处沿中压室向左传播 (参看图 16)。激波与稀疏波相撞后, 一新激波继续向右传播, 另一稀疏波继续向左传播。在此激波与稀疏波之间有均匀流场 (如图 16 所示的(3)及(4)区), 两流场之间隔以接触区, 接触区的熵有连续的变化。

3. 两稀疏波相撞:

假若上述激波管中间一室的压力高于其他两室的压力, 则在两薄膜破裂后, 在中间室发生两稀疏波互撞的现象。两稀疏波相撞后, 两新稀疏波背向而驰, 其间产生一均匀流场 (如图 17 所示的(3)区)。据理论上推算, (3)区可以达到完全真空, 但须无限大时间。图 17 中所示之贯穿区系指两波正相撞, 不像其他区能以简单波就可说明, 本文不作介绍。

4. 两同方向传播的激波相撞的问题:

如图 18 所示, 两同方向的激波相撞后, 产生一向右传播的激波及一向左跑的稀疏波, 两者之间有均匀流场, (如图 18 所示(2)区与(3)区), 两场之间隔以一向右移动的接触面。

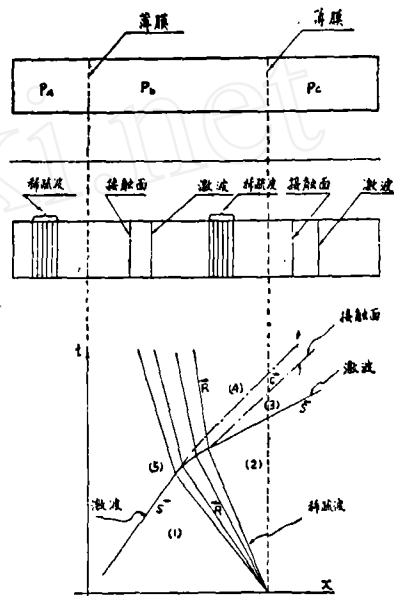


图 16 中间室的压力小于左端一室, 大于右端一室, 激波与稀疏波在中间室相撞

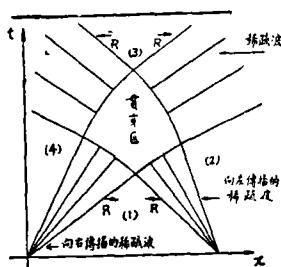


图 17 中间室的压力大于两端的压力, 图示两稀疏波在中间室相撞前后

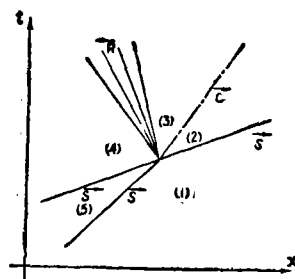


图 18 两同向前进之激波相撞前后

III. 激波管可以用来研究某些原子物理学及电磁流体力学的问题

再看图 12。当激波由管左端被反射回来时, 在反射激波后面 (图 12 所示(5)区) 产生一温度很高的静止区域, 其温度为 $T_5 = T_2 P_{52} (\alpha_1 + P_{52}) / (1 + \alpha_1 P_{52})$ 。设起始气体温度为 300°K , 激波的马赫数为 5, 则该区温度达 $5,000^\circ\text{K}$ 。这一区连同以前已说明过的(2)区, 因其高温的关系, 使激波管成为研究原子物理学及电磁流体力学的工具。

我們知道，在高温时气体有六种动能：

1. 分子直綫运动能，2. 分子轉动能，3. 分子振动能，4. 电子激动能，5. 分子分离为原子的能，6. 电离能。

当压力慢慢变化时，各种能平衡地变换。但压力突然增加时，直綫运动能与轉动能瞬时增加(單原子分子沒有轉动能)，然后借分子相撞作用，部分直綫运动能变换为其他动能，如振动能等。經過一段时间，各种能轉換重新达到平衡。我們叫直綫运动能与轉动能为活躍自由度能，其他的为不活躍自由度能，如此的現象也叫張弛現象，从压力突变到平衡的时间叫張弛时间。在低温时，不活躍自由度能很小；温度較高时，例如 $2,000^{\circ}\text{K}$ 以上，振动能与分离能显出重要性；在 $5,000^{\circ}\text{K}$ 以上，电离与电子激动能也显出其重要性。当气体通过激波时，压力突然增加。由于激波仅有相当于分子自由路程的厚度，一分子在这狭小的距离内只能有二三次相撞，所以直綫运动能与轉动能突然增加，而其他的能轉換要在激波后面另一較激波略寬的狭小距离内才能达到平衡。圖19足以表明激波的物理态，也足以說明可以用激波管来研究張弛現象、分离及电离等問題。

圖19的 P_1, ρ_1, T_1 及 V_1 代表激波前气体的压力、密度、温度及速度； P_2, ρ_2, T_2 及 V_2 代表激波后力、密度、温度及速度。这些是根据蘭肯-雨果里的压阿公式并只考虑活躍自由度能計算的值。 P_2^*, ρ_2^*, T_2^* 及 V_2^* 代表激波后能轉換达到平衡之后的压力、密度、温度及速度。 L_1 是只考虑活躍自由度能的激波厚度， L_2 是不活躍自由度能轉換达到平衡的距离或激波厚度。

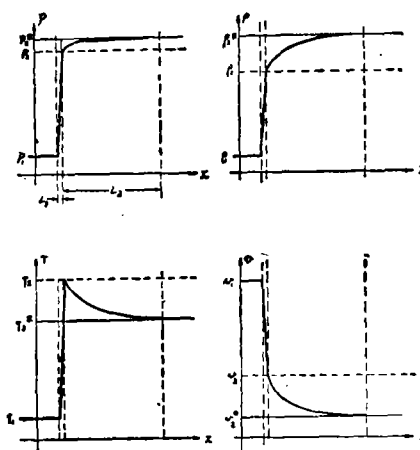


圖 19

IV. 激波管可以用来研究燃燒爆炸問題

从前研究燃燒爆炸的問題是用火焰管来試驗。火焰管是一根兩端封閉的長管子，盛滿可燃的混合物。在火焰管的一端点火引起燃燒，就有一个稳定的火焰加速地沿管傳播，如管子有足够的長度，則最后产生爆震。火焰管的缺点是实验不易控制。可是，我們知道爆震波的前头部分是一个激波，在激波的后面温度很高，有化学变化。所以如果我們把一个激波送入可燃的气体混合物，就有可能通过高温而引起化学变化，从而能引起燃燒，也能引起爆震。因为在激波管里激波的强度能够十分精确地控制，所以激波管也就成为一种良好的研究燃燒和爆炸問題的工具。

V. 化学激波管

燃燒学的一个中心問題是高温下的化学反应动力学。虽然这方面的研究有些發展，可是完善的理論尚未建立起来；目前还需要多做些实验来証明已引用的假設，为將来的理論建立基础。高温化学反应实验的困难是温度太高及反应时间太短。例如在一个温度达 $2,000^{\circ}\text{K}$ 、反应时间仅几千分之一秒的化学反应实验中，就碰到下面这些問題：1. 如何可以把作用的气体很快地从低温升到高温，以免从低温到高温的过程中有显著的成分發生化学变化，从而能准确地測量在某一特定高温时的化学反应率；2. 如何可以很快地冻结化学反应成分，以便进行分析；3. 什么材料可以耐高温。普通的激波管加上如圖20中

所示的真空罐及薄膜就成了一个可以满足上面要求的化学激波管。在低压室中盛以作用气体，刺破高压室与低压室之间的薄膜时产生激波，反射激波将作用气体压缩至高温产生化学变化。在稀疏波到达左端薄膜以前我们刺破真空罐的薄膜，产生一个很冷的稀疏波，它把被反射激波烧热的反应气体冻结起来。又反射激波到达真空罐以后不能再度反射回来，因此作用气体也不再受到第二次高温的侵袭，从而能保证准确地测量高温化学反应率。



图 20 化学激波管简图

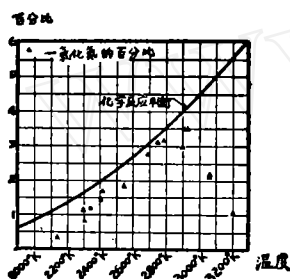
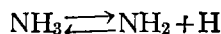


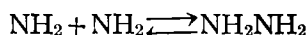
图 21 空气转变为二氧化氮的百分比

除了上述应用外，化学激波管还可能应用到化学工业生产方面（利用激波管具有高温及低温的脉动特点）。美国康乃尔大学实验室用上述化学激波管作了氮气固定法的实验。其结果如图 21 所示：

由图 21 看来，温度低于 2,500°K 时，一氧化氮的百分比低于平衡百分比，这是由于在化学激波管中的化学反应没有充分的时间达到平衡。在 2,500—3,000°K 之间，实验的结果与化学反应平衡接近。在 3,000°K 以上时，一氧化氮百分比突然下降，这是由于该真空罐太小，结果反应气体受到第二次高温侵袭，而使部分一氧化氮分解。如果增大真空罐的体积，或使用其他办法，实验的温度还可以提高到 3000°K 以上。根据同一原理，我们也可以试验许多其他化学反应。例如从氨制造肼，就可以用化学激波管，当反射激波烧热氨时，发生下列反应：



经过稀疏波的冷却作用，则



大家知道肼是用于火箭的燃料。

由上可见，激波管对于化学工业是可能有革命性作用的，因此，化学与空气动力学的工作者们应当合作起来发掘这新园地的理论。

VI. 激波管的其他用途

激波管还可以用来测量凝结核之形成率：我们可以在高压室中盛以饱和空气，当薄膜破裂时，稀疏波的扩张作用使高压室的空气冷却而开始凝结核，这时就可以量出其冷凝率。假如我们将低压室不封闭，还可以做关于激波送入大气的实验；假如我们将高压室开口，还可以进行稀疏波送入大气的实验。这方面的理论尚待研究。

五 产生强激波的几个办法

1. 在高压室中盛以可燃性气体，然后令其燃烧，借燃烧后的压力突然增加使薄膜爆破，便可产生强激波。
2. 用高压放电使高压室的气温及压力突然增高，也可以产生极强的激波。
3. 缩小低压室的横断面，即高压室的横断面比低压室的横断面大，也能产生强激波。如欲得到更强的激波，可用薄膜再把高压室分隔成两室。举一个简单的例子，如图

22 所示:

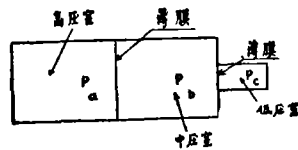


圖 22

用一薄膜把左方横断面大的部分隔成高压室及中压室，另一薄膜裝在横断面突然縮小处。先讓左边的薄膜破裂，产生一激波，該激波到达右边薄膜时即將該薄膜冲破而产生一更强的激波（右端一室的压力必須最低）。

4. 可以設法使激波追赶另一激波，兩波相碰后产生一新激波，其强度增加很大。例如压力比为 100 的兩激波相重合后可产生一压力比为 4,200 的强激波。

六 关于激波管設計及制造的一些問題

近年来激波管的發展如雨后春笋，不能一一介紹，只將一般激波管的設計問題，作一些很簡單的說明。采用何种激波管，是以实验的对象来决定的。假如要研究激波、稀疏波以及接触面的相互影响，一个金屬管上加上光具組就成了；假若要研究强激波产生的电磁流体問題，可用金屬管作为高压室，而用玻璃管作为低压室；如果我們要研究模型在均匀流場中的現象，則宜用横断面为正方或矩形的金屬管，以便裝置照相用的玻璃窗、模型、压力計及热綫風速計等。横断面的大小以模型的大小来决定。管壁的厚度要能担負高压室的最大压力。可以在低压室距薄膜适当距离处裝置一个或兩個窗戶，窗口的地点應該是均匀流場維持時間最久的一点，以便进行模型試驗；又窗口用的玻璃須适合光具組照相的要求，須保証玻璃与管子銜接处不漏气。管壁务須光滑。薄膜在压力差不大的情形下可用賽璐玢及纖維素乙酸鹽的材料，在压力差大的情形下可用銅或鉛片。賽璐玢破裂的性質較好，在破裂时对于管流的阻碍很小。用照相測量管流的方法就是普通風洞实验中所用的三种方法：即陰影法、雪萊林法及光干涉法。在激波管实验中常用雪萊林法（可參看流体力学書籍）。一般可用水銀压力計測量起始时的压力。实验用的气体可以用空气、氫、氮、二氧化碳、氫、氮或氧。当高压气体进入高压室后須等待温度平衡后方可进行实验。具体的一些測量技术問題，这里就不多說了。

总起来說，可以应用激波管进行研究的对象大致包括：激波，接触面及稀疏波之間的相互影响，亞音速流，跨音速流，超音速流，高超音速流，波之折射与反射，激波的消失，附層面的成長，冷凝結，音速測量，激波对結構的載荷，張弛現象，火焰傳播，高温化学动能，电磁流体现象，燃燒爆震現象。它有数万度的高温流場，也有近于絕對零度的低温的短時間均匀流場。这些都可能給研究原子物理学及低温物理学提供良好的条件。

根据現阶段研究的成果，很难說激波管已完全成功地代替了風洞。还須要設法直接測量激波与接触面及接触面与稀疏波之間的兩均匀流場的物理态，以便确定其是否均匀

