



冲击波基础知识

章冠人

(1982年9月1日收到)

一、什么叫冲击波？

如在一个密闭管道的中间用一膜片隔开，一边充以高压气体，另一边充以低压气体，在某一瞬时，设法将此薄膜弄破，一边的高压气体就将压缩低压气体，如图1所示。在膜片后边将产生一个以一定速度传播的不连续面。在这不连续面的两边的密度、压力、粒子速度等等有一个突变。这个面就称为冲击波阵面，这种在介质内传播的扰动，就称为冲击波。同样，用一高速飞片或弹丸撞击靶板，在靶板内也能产生冲击波；和炸药相邻的周围介质内，当炸药爆炸时，也能产生冲击波的传播。广义而言，冲击波是一个以一定速度移动的不连续面。

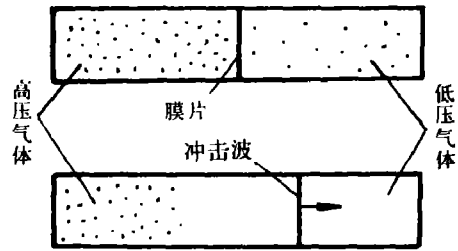


图1 冲击波的产生

二、冲击波的某些性质

1、冲击波阵面前后物理量的关系

当一个冲击波以速度 D 在物质中传播时，用足标“0”表示冲击波阵面前方的物理量，足标“H”表示冲击波阵面后方的量，见图2。则在冲击波阵面前后物理量之间遵守质量守恒、动量守恒和能量守恒定律

$$\rho_H (D - u_H) = \rho_0 D \quad (2.1)$$

$$P_H - P_0 = \rho_0 D u_H \quad (2.2)$$

$$P_H u_H = \rho_0 D \left[(e_H - e_0) + \frac{1}{2} u_H^2 \right] \quad (2.3)$$

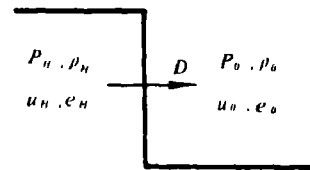


图2 冲击波阵面前后物理量的关系

式中 ρ 为密度， u 为粒子速度， P 为压力， e 为内能。从式(2.1)—(2.3)可以得出所谓雨贡纽关系，或冲击绝热关系

$$e_H - e_0 = \frac{1}{2} (P_H + P_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H} \right) \quad (2.4)$$

还可以求出冲击波速度 D 和粒子速度 u_H ，分别为：

$$D = V_0 \left(\frac{P_H - P_0}{V_0 - V_H} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

$$u_H = [(P_H - P_0)(V_0 - V_H)]^{1/2} \quad (2.6)$$

式中 $V = 1/\rho$ 。一般讲来，从式(2.4)—(2.6)，必须同时知道 P_H 和 V_H 方能求得 e_H 、 D 和 u_H 。如只单独知道 P_H 或 V_H ，要想求出 e_H 、 D 和 u_H ，必须另外给一个只与材料有关的关系式：

$$P = f(e, V) \quad (2.7)$$

这个关系式称为材料的状态方程。材料的状态方程有各种各样的形式，最常用的是等熵状态方程

$$P = A \rho^\nu + B \quad (2.8)$$

这种状态方程中，材料的压力只和密度 ρ 有关， A 、 B 和 ν 对一种材料是常数。

2、冲击波速度 D 和波阵面后粒子速度 u 之间的线性关系

根据实验结果和理论证明，在相当宽的压力范围内，在同一种介质中，冲击波速度 D 和波后粒子速度 u 之间存在如下线性关系

$$D = C_0 + \lambda u \quad (2.9)$$

式中 C_0 、 λ 对同一种介质是常数。表 1 列举了几种常用材料的 ρ_0 、 C_0 和 λ 值。

表 1

材 料	ρ_0 (克/厘米 ³)	C_0 (毫米/微秒)	λ	适用范围(万巴)
有机玻璃	1.19	3.16	1.25	6 ~ 37
Al	2.79	5.44	1.34	22 ~ 180
Cu	8.466	3.94	1.47	50 ~ 270
W	19.2	4.049	1.215	30 ~ 450

3、雨贡纽曲线、等熵线和等温线间的关系

沿雨贡纽曲线式(2.4)

$$H(P, V) = e_H(P, V) - e_0(P_0, V_0) + \frac{1}{2}(P + P_0)(V - V_0) = 0 \quad (2.10)$$

利用上式和热力学第一定律，可以证明在 (P_0, V_0) ，其熵的一阶微分和二阶微分等于零。

$$dS = 0, d^2S = 0 \quad (2.11)$$

而

$$d^3S > 0$$

因此，经过冲击波阵面前后，熵的增加为三阶小量。这表示熵的变化很小，所以可以近似应用等熵状态方程(2.8)。在 (P_0, V_0) 点，雨贡纽线和等熵线成二阶相切，且雨贡纽线在等熵线的上面，而等熵线又在等温线的上面，如图 3 所示。这是因为冲击压缩时要增加熵，在方程式(2.8)中的 A 要增大，所以在同一个比容时，雨贡纽线的压力要比等熵线的压力大，雨贡纽线就在等熵线的上面。又因等熵线的温度是增加的，而等温线温度不变，后者作功较小，故它在等熵线的下面。

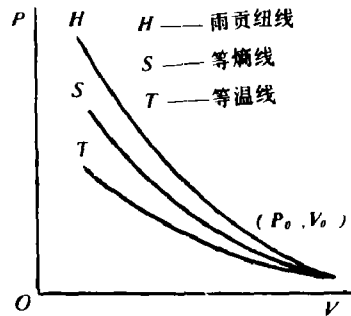


图 3 雨贡纽线、等熵线和等温线

4、冲击波阵面速度与音速的关系

冲击波阵面速度相对于波前是超音速的，相对于波后是亚音速的，即

$$D > u_0 + C_0 \tag{2.12}$$

$$D < u_H + C_H$$

其物理意义为波阵面可以赶上前方任何传播着的扰动，而波阵面后的任何扰动都能赶上波阵面，并使其强度发生改变。

三、冲击波对障碍物的反射、透射和绕射

当冲击波在介质内传播时，如果介质内存在其它障碍物，则和其它波动一样，要发生反射、透射和绕射作用。例如有一冲击波垂直于一固壁平面入射时(如图4所示)，就要产生正反射。反射冲击波后面经过了两次冲击波的作用，压力一定要增大。一般对强冲击波，在空气内($\gamma = 1.4$)， $p_2 \approx 8p_1$ ；对于弱冲击波 $p_2 \approx 2p_1$ 。

如冲击波阵面与固壁成 α_1 角入射时(图5)，则要产生斜反射。图中的(1)区表示入射波没有到达的区域，(2)区表示入射波后的区域，(3)区表示反射波后的区域。当入射角 α_1 由小增大到一定的 α_{1H} 时，固壁将先把冲击波推离固壁一段距离，形成一个马赫波，如图6所示，这种反射称为马赫反射。(4)区为马赫波后区。

如障碍物不是固壁而是另一种密度不同的介质，则冲击波将透射入内形成透射波。由于障碍物的波阻抗的大小不同，在原传播介质内或产生反射冲击波，或产生反射稀疏波。

如障碍物不是无穷平面而是有限大小的物体，则冲击波可以绕过物体而发生绕射，形成绕射冲击波(见图7)。

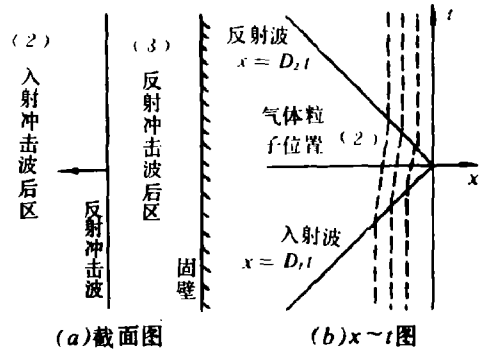


图4 冲击波的正反射

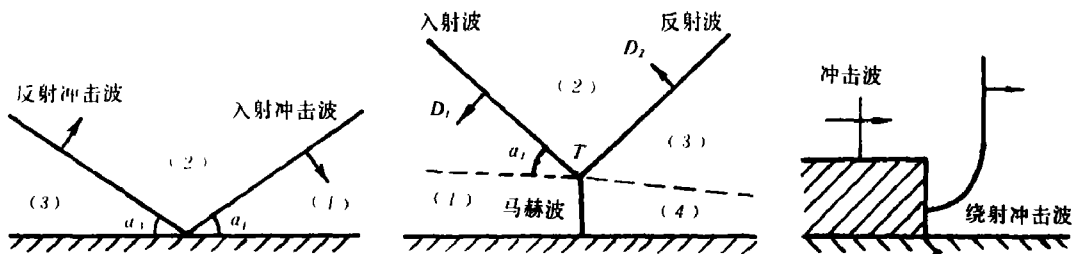


图5 冲击波的斜反射

图6 马赫反射

图7 绕射冲击波

图5、图6中：(1)区表示入射波没有到达的区域；(2)区表示入射波后的区域；(3)区表示反射波后的区域；(4)区表示马赫波后的区域。

四、散心冲击波和聚心冲击波

如冲击波源在球的中心点，则在同一球面上的冲击波强度是一样的，且随远离球心而减弱，这就是散心球形冲击波。一般炸弹在空中爆炸产生的空气冲击波就是这种情形。反之如能设法使在同一球面上的冲击波向球心传播，由于向中心传播时球面的缩小，能量逐渐会聚，可以造成极高的压力和温度，甚至可达热核反应的程度，这就是聚心冲击波。现代利用激光照射氘氟小球产生热核反应，就是应用这个原理。

五、冲击波阵面的结构

由于一般介质均存在粘滞性和热传导性，而不是理想的介质，在冲击波阵面前后的物理量不是形成阶梯状突然变化的，而是在一很薄的层内（约几个分子自由程距离）逐渐变化的，而且各物理量的变化规律也不一样，如图8所示。图中 T_e 和 T_i 表示电子温度和离子温度， ρ 表示密度。

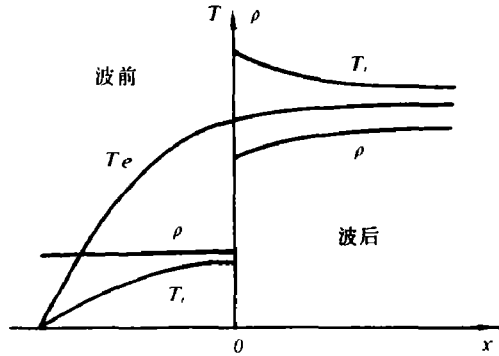


图8 冲击波温度和密度分布

六、实验室内产生冲击波的常用方法

一般在高压实验室内，通常采用三种方法产生冲击波。一种方法是用炸药爆炸产生冲击波；另一种方法是气炮发射弹丸产生冲击波；第三种为激波管。

1、炸药爆炸方法

最常用的方法是将炸药做成一种平面波发生器，如图9所示。利用高低爆速炸药的配合，雷管爆炸后，引起平面波发生器的炸药爆炸，爆轰波抵达和其紧贴的飞片的时间，几乎是同时的。这样，飞片以极高的速度飞行，打在靶上，在靶中即产生几乎是平面的冲击波。其压力视靶材而定，一般可达几十万大气压，最高到几百万大气压。

2、气 炮

用气炮产生冲击波的原理如图10所示。图10是两级氢气炮的原理图。当点燃火药后，活塞压缩氢气到一定压力，膜片就破裂，在炮管内产生冲击波，推动抛射体打到靶上，在靶内即产生供试验

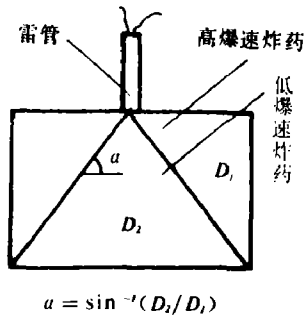


图9 平面波发生器

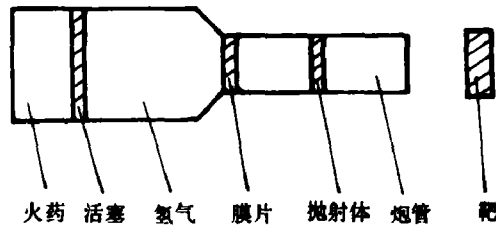


图10 气炮原理

用的冲击波。一般抛射体如用几克的质量，其速度可达每秒十分之几公里——几十公里的数量级，靶内压力可达几万大气压到几百万大气压。

3. 激波管

激波管是获得较低压力气体冲击波常用的设备，其原理和气炮的第一级相似。它不用火药推动活塞压缩气体，而直接充以高压气体，到一定压力后，膜片突然破裂，在管内就产生气体冲击波。通常研究气体分子在高温高压下的激发，分解，游离，化学反应速率等均用这种击波管观察，十分方便。一般压力可达万大气压，温度可达几千度。如用电磁击波管，压力和温度可以达几十万大气压和十几万度。

七、冲击波的量测技术

由于冲击波的压力甚高，不能应用通常的测压方法，所以冲击波的压力一般均应用测量冲击波的速度和粒子速度等进行换算得来。为了测量速度，冲击波走过的距离可以预先测量好，所以，只须测量时间就可以了。测量冲击波到达时间的方法很多，通常用的有下列几种。

1. 高速转镜

高速转镜原理如图11所示。利用高速转动的平面反光镜（通常GSJ相机为每分钟6万转），将高速变化的图象展示在照相底片上（GSJ相机的记录速度为3毫米/微秒）。在冲击波的情况下，利用冲击波阵面上的高温作用产生的辐射光，由高速转镜记录下来，由此确定冲击波到达该处的时间。

2. 激光干涉仪

原理如图12所示。利用冲击波到达靶自由面时的运动使在它的表面上反射的激光发生频率变化，即利用多普勒效应来测量运动的速度。

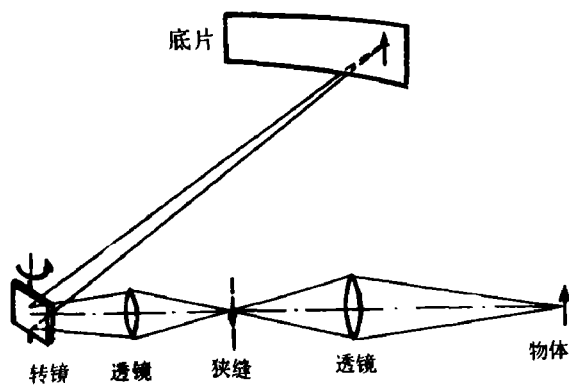


图11 转镜原理图

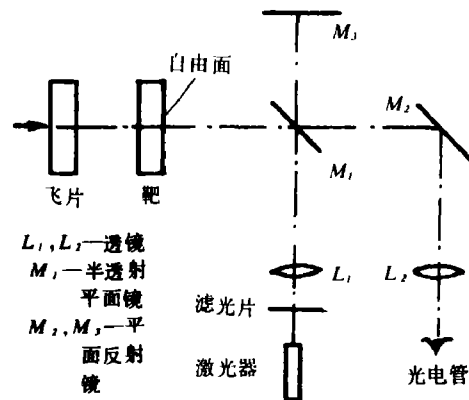


图12 激光干涉仪原理图

3. 电探针法

电探针是金属针状物，如图13所示。将它们和脉冲发生线路联接，另一端和靶相联系。当冲击波到达时，自由面运动接通探针，使脉冲电路放电，因而可在示波器上记录下来，确定接通的时间。如图所示，由探针1和探针2接通的时间差和距离 d_1 ，即可以确定冲击波在靶内的速度。由探针2和3接通的时间和它们间的距离，即可确定自由面的运动速度。

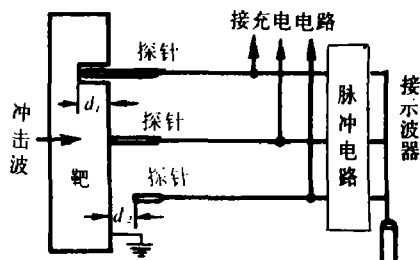


图13 电探针测速原理图

4. 电容法

原理如图14所示。图中固定片和靶的上表面构成一个电容器。当冲击波出靶的上表面时，引起表面运动，电容就发生改变，如预先对电容器充了电，就会有讯号输出。利用这个讯号就可以确定自由面开始运动的时间及速度。

5. 电磁法

电磁法的原理，主要是利用冲击波后粒子有一定的运动速度这一情况。如图15所示，将一段导线埋在介质内，把它们放在一恒定磁场 \vec{B} 内，磁场方向垂直于冲击波方向和导线。当粒子以一定的速度运动时，该导线也以这个速度运动。导线运动时要切割磁力线而产生感应电动势，将其输到记录仪器，测出电动势的大小和产生的时间，就可以确定速度大小和运动开始时间。

冲击波的测量方法很多，已经形成了一门专门技术学科，所以这里不能一一介绍。

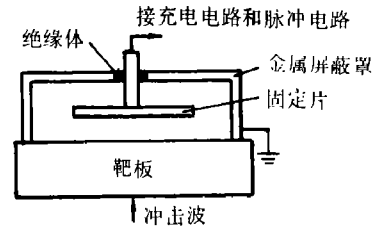


图14 电容法原理图

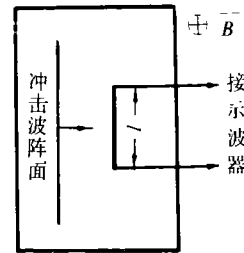


图15 电磁法原理图

八、冲击波的应用

冲击波的应用十分广泛。无论在科学研究方面，民用和军用方面均占据着重要的地位。我们先来讲一讲在科学研究方面的应用。

1. 固体物理和材料科学方面

因为冲击波是在实验室内最容易获得的高温高压条件，所以，研究物质在各种状态下的性能时，尤其是在高温高压状态下的性能时，利用冲击波进行研究是最方便的了。例如用冲击波可以研究物质的状态方程，电磁性质，原子间的势能，金属的硬化，相变，动态断裂和本构关系等。例如1956年D·Bancroft用冲击波实验发现了铁在13万大气压处产生相变，推动了以后对金属相变的研究。

2. 地球物理科学方面

地球物理学家之所以应用冲击波技术，是因为要了解地球内部的成分，而地球内部处在高温高压状态；另外对陨石的性质也有兴趣，而陨石是由高速碰撞过程产生的。所以，要研究它们的性质必须用同样的高温高压和高速手段去模拟其环境条件方能知道其道理所在。例如，为了估计地球内部岩石成分的组成，可以设法测出温度随深度压力的变化规律，然后将各种不同成分的岩石用冲击波测其雨贡纽曲线做模拟，看哪种成分的岩石在受压缩时，其温度变化随压力的关系和其相同，则该处地壳的成分就是这种岩石。又例如月球上火山口的问题，有人认为是陨石高速碰撞形成的陷坑。为了弄清这个问题就可以对岩石进行冲击试验，研究其特点，看其与火山口的岩石有何不同。

3. 冲击波化学科学方面

冲击波化学是一门十分有希望的学科，主要研究在冲击波作用下的化学反应。例如，在煤气化时用 TiO_2 粉末作为催化剂，在冲击波作用后，催化作用可以增加 10^3 倍。由于冲击波具有压力高、加热快、冷却也快等特点，对化学反应能起一些特殊的作用，形成特殊的化合物或提高反应效率。因此，冲击波可能对国民经济起很大的作用，值得进一步研究。

此外在民用方面，冲击波技术具有广泛的用途，如爆炸焊接，爆炸压床，冲击烧结，爆炸发电机，合成新材料如人造金刚石和氮化硼等。尤其在能源研究方面最有希望的激光或电子束聚爆氙气

小球，在可控聚变方面是离不开冲击波技术的。

在军事应用方面则更为广泛，如炸弹爆炸产生爆炸波的研究，无论在常规炸弹或原子弹、氢弹的研制和防护上均是十分重要的问题；其它如穿甲弹的设计和防护，普通弹丸的加速，弹片的破碎等，另外在超音速飞机的设计，导弹的设计，空间科学等方面均牵涉到冲击波物理方面的问题。因此冲击波物理在第二次世界大战以后得到了极大的发展，其原因就在这里。

FUNDAMENTAL KNOWLEDGE OF SHOCK WAVES

Zhang Guanren

下 期 要 目 予 告

鼓包运动和抛掷堆积·····	刘殿中 王中黔
龙首山大爆破鼓包发展过程的摄影观测·····	许连坡
阻抗匹配法测爆压的研究·····	于德洋 曾雄飞 徐 康
炸药爆轰产物流场的分析及实验研究·····	赵衡阳
固体的二次冲击雨贡纽线的一个表示式·····	杨秀会 赵国桥
冲击波研究中运用的激光差分混频技术·····	胡绍楼 王文林 俞 诚
充流体园柱壳的塑性动力反应分析·····	李文庆
碰撞焊件金相组织分析·····	张登霞 李国豪 周之洪 邵丙璜
F 4 /203A 型锰铜压力计对撞击载荷的响应·····	池家春 吴国栋
国产 GSJ 型相机分划板 狭缝扫描象质的改善·····	韩立石