

ABSTRACT

In this dissertation ; the theoretical analysis and experimental investigation were carried out to study the attenuation rule of shock wave in steel plate and steel-aluminum plate under contact explosion.

The theoretical analysis obtains the attenuation rule of shock wave. The result of theoretical analysis is agreement with the result of experimental investigations from analysing, so correctness of theoretical study and experimental investigations was proved.

Using the fiber-optic probe technique, the time when the shock wave reaches the different places in steel plate and steel-aluminum plate under contact explosion with insensitive RDX and aluminize RHTL had been separately measured. And the attenuation rule of shock wave, which was produced by the insensitive RDX and RHTL separately, in the above two materials have been obtained by the Hugoniot relation of each material.

Experimental investigation indicates that shock wave velocity and shock wave pressure of beginning which were produced with aluminize RHTL were smaller than that of insensitive RDX in steel plate, however, attenuating velocity of shock wave velocity and shock wave pressure which were produced under contact explosion with aluminize RHTL were quicker than that of insensitive RDX in steel plate. when steel- plate had been separately operated under contact explosion with insensitive RDX and aluminize RHTL , and shock wave press had changed suddenly in the interface between steel and aluminum. In the circumstances, the shock wave velocity had ascended suddenly and shock wave pressure had descended suddenly.

Key words: contact explosion shock wave attenuation rule

insensitive RDX aluminize RHTL

声 明

本学位论文是我在导师的指导下取得的研究成果，尽我所知，在本学位论文中，除了加以标注和致谢的部分外，不包含其他人已经发表或公布过的研究成果，也不包含我为获得任何教育机构的学位或学历而使用过的材料。与我一同工作的同事对本学位论文做出的贡献均已在论文中作了明确的说明。

研究生签名：_____ 年 月 日

学位论文使用授权声明

南京理工大学有权保存本学位论文的电子和纸质文档，可以借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容，可以向有关部门或机构送交并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容。对于保密论文，按保密的有关规定和程序处理。

研究生签名：_____ 年 月 日

1 绪论

1.1 研究背景

研究在不同炸药接触爆炸作用下金属板中的冲击波运动规律,通过在金属板中冲击波参数的实验测量,研究冲击波在其中传播衰减过程,同时研究不同炸药作用于金属板的效果,这些知识对于炸药爆炸对金属、岩石等固体介质的直接作用,聚能装药爆炸所形成的高速金属射流的破甲作用,碎甲弹爆炸的碎甲作用以及高速物体碰撞等问题的研究有着密切的关系,能够给武器战斗部设计、舰船的设计等等提供基本参数和科学依据。尤其本课题采用 45#钢作为主要研究对象,是因为 45#钢是广泛采用的一种材料,在航空、航天、交通运输工具、国防工业等许多领域,具有广泛的应用背景。在这些应用领域,材料不仅会受到静态载荷,还会受到动态载荷,而它的动力压缩性规律(Hugoniot 曲线)在应用中显得尤为重要。高压下材料的状态方程(Equation of State-EOS)数据对很多物理分支如地球物理、天体物理以及相关学科的研究是非常重要的。利用动态加载技术精确测量材料的 EOS 参数是冲击波物理领域的一项基本研究内容,虽历经数十年的发展和完善,但由于武器的工程设计和理论计算不断精密化的要求,因而直至今日仍然是战斗部设计工作者和爆炸力学工作者研究的重要内容。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 冲击波在密实介质中衰减规律的研究

在密实介质中冲击波速度随着运动迹线 x 衰减规律的理论研究比较早,在李维新编著^[1]的《一维不定常流与冲击波》中比较系统的理论介绍了凝聚介质中冲击波的衰减,也提到了一维等熵流动的通解问题,为我们的理论研究提供了一些研究基础。王海福等^[2]用实验的方法研究了多孔材料中冲击波衰减特性,通过脉冲网格法对不同初始孔隙度的多孔铁中冲击波速度的测量,从而从实验的基础上验证了冲击波的衰减规律。王永刚^[3]等人通过实验和数值模拟对泡沫铝中冲击波传播特性进行了研究,结果表明:冲击波在泡沫铝中传播时显示明显的衰减特性,这种衰减耗散特性主要来源于泡沫铝本身的本构粘性效应,而追赶卸载效应又会进一步促进冲击波的衰减,这为泡沫铝作为新型抗冲击缓冲材料提供了设计基础。从而在理论、实验以及数值模拟不同方面都提供了一定的研究基础。

1.2.2 冲击波参数测量方法

在研究冲击波在密实介质的传播规律上,主要测量方法是冲击波速度 D 和质点速度 u 的测量,现在国内外应用的研究方法主要是自由面速度 u_{fs} 的测定方法和冲击阻抗匹配方法或冲击制动方法。美国的洛斯阿拉莫斯(Los Alamos)国家实验室选用了铝、铜、铁、铀—钼合金(钼的重量比为 3%)分别作为低、中、高三种冲击阻抗的标

准材料^[4]。80 年代, A.C.Mitchell and W.J.Nellis^[5]研究了铝、铜、钽的冲击波压缩性曲线, 利用的就是冲击阻抗匹配法, 在用二级轻气炮加压到 20-430GPa 的压力范围内, 测量了铝、铜、钽的冲击波压缩性曲线, 即 Hugoniot 曲线。近几年中国工程物理研究院流体物理研究所的袁树云, 彭其先^[6]等人研究了多点双灵敏度 VISAR 测爆轰驱动金属飞片自由面速度, 探索爆轰产物驱动金属飞片的运动规律, 用多点双灵敏度 VISAR 对金属半球三个不同角度的速度历程进行了测量, 得到飞层运动的速度-时间曲线, 为理论分析与数值模拟提供了条件, 在 1972 年, Barker L M, Hollenbach R E.^[7]进行了任意反射表面速度干涉仪(VISAR)可以非接触连续精确测量高速运动目标的速度的研究, 取得了较好的成果。

国内外在测量技术方面的研究中, 早期多采用光、电探针测量冲击波到达自由面及刚出自由面一点的到达时间差, 然后用这时间差除两点的距离来推算冲击波速度。后来又发展了多种光电测试技术, 例如闪光隙技术、反射光消失法(包括斜反射镜和斜棱镜)^[8]、光学像技术、轨迹法等等。经过 B.T.Amery^[9], W.F.Hemsing^[10], W.C.Sweatt^[11]等科学家的研究改进, VISAR 在仪器结构、输入系统、记录系统、数据处理技术等各方面都得到很大的发展, 已成为冲击波研究领域的标准测试手段之一。在应用电探针测试技术方面, 1955 年 Goranson、Duff 等人^[12-13]发现用甲烷等气体代替空气能有效地防止电探针的提前接通。在国内, 唐敬友^[14-15]等人用炸药透镜加载装置观察到置于氦气与氩气中的电探针回路有不同的导通现象。从这些文献可以看出电探针测试技术的不完美之处。应用高速摄影的方法进行的爆炸研究已经不少, Zhi-Yue Liua, Shiro Kubota^[16]等人研究了高速摄影在高速爆炸中的应用, 而且建立了实验装置, 取得了不错的效果; OLa Wall^[17]研究了在钢样品中的动力层裂传播应用到高速摄影的方法记录实验数据。在国内, 关于高速转镜的研究也有一些, 吴云峰^[18]研究了转镜式高速相机控制系统, 谭显祥^[19]研究了高速扫描相机时间测量不确定度分析, 同时讨论了进一步降低转速测量不确定度和位置误差的方法。刘宁文^[20]等人讨论了两台联动转镜式高速相机像漂移的各种原因, 从理论和实验对相机像漂移的影响因素进行了分析, 比如磁电式传感器、材料、制作工艺、装配精度及操作不当等。从这些研究可以看出高速摄影测试技术还存在测试精度的问题。长期以来, 电探针和高速摄影是冲击波物理与爆轰物理实验研究中主要的诊断手段之一, 可以在爆轰压力、速度、金属材料中的冲击波、高压下物质压缩方程、飞片速度测定等实验中确定爆轰波、冲击波到达特定位置的时间及碰撞或冲击发生时间, 以便得到炸药爆轰参数、冲击波速度和飞片速度等信息, 在流体动力学物理参量的测量中发挥了重要作用^[21], 取得了许多有价值的成果。但是, 由于电探针易受空间电磁场的干扰, 使其在强电磁环境中无法使用。特别是爆轰实验中由于炸药爆轰产物的电离度较高, 电探针无法采用密集安装的方式对其爆轰阵面进行测量; 而高速摄影技术, 由于其转速的不均匀性给时间测量带来了较大的误差。

石英光纤探针,由于其不受电磁干扰的特性,而且有着优良的响应特性^[22-23]。因此,光纤探针测量技术^[24]应运而生,经过近几年的发展技术逐步成熟。在国外,光纤探针已被用于测量飞片速度、飞片平整性、样品中冲击波速度和声速以及测量炸药爆速和爆轰波阵面^[23, 25-26]等,取得了许多有价值的成果。

1.2.3 冲击压缩性规律与接触爆炸的研究

冲击压缩性规律(Hugoniot 曲线)和 Hugoniot 参数是冲击波衰减规律研究的基础。八十年代, A.C.Mitchell and W.J.Nellis 研究了铝、铜、钽的冲击波压缩性曲线,得出了铝、铜、钽的 Hugoniot 参数以及相关的关系可以作为冲击波实验的标准材料的状态方程。国外其他科学家进行了多种材料的冲击 Hugoniot 实验测量^[27-31]。在国内,王翔^[32]的硕士论文中介绍了金属材料状态方程精确测量的研究,测量了 Cu、Ta、Pt 等标准材料在 30-600GPa 压力范围内的 Hugoniot 数据,实验测试结果与国外发表的数据有很好的一致性。从以往的研究可以看出金属介质的冲击压缩性规律(Hugoniot 曲线)和 Hugoniot 参数的研究已经比较成熟。

由于研究目的的不同,研究人员对炸药与物体的接触爆炸进行了不同方面的研究工作。Seyed Hadi 等人^[33]用 Tensor 程序数值模拟研究冲击载荷形状和持续时间对圆板塑性变形过程的影响,研究表明脉冲形状对板中心的挠度没有显著的影响。S.Chung 等人^[34]对带加强筋正方形板在炸药直接爆炸作用下的响应进行了实验研究,并用 ABAQUS/Explicit 有限元程序进行了数值模拟。周睿、冯顺山等人^[35]研究条状爆炸载荷局部作用于金属矩形板的断裂效应,提出了断裂临界判据,得到靶板达到临界断裂点时所需的冲量准则。盖京波等人^[36]对舰船板架在接触爆炸载荷作用下的变形问题进行了研究,得到了四边固支的板架残余变形的近似计算公式,给出了估算破口半径的近似方法。这些研究者主要目的是研究爆炸载荷对目标宏观上的毁伤、破坏。

此外,一些研究者还从微观的角度研究了炸药与目标接触爆炸的现象,对冲击波在目标介质中的传播规律进行了研究。Stanislaw^[37]、韩勇^[38]研究冲击波在有机玻璃中的传播规律,是为了研究含铝炸药的能量释放规律。朱兆祥、李永池^[39]等人用一维运动模型对高能炸药在钢板表面接触爆炸时钢板中的应力波的传播及其在钢板自由面上反射后引起的层裂现象运用差分法进行了数值计算,计算结果与实验结果较符合。王礼立等人^[40]对该问题运用逐步近似的方法进行了计算,结果表明只需要简单的计算就能达到与差分方法相近的结果。陈熙蓉等人^[41]以 TNT 作为爆炸加载,测试炸药产生的冲击波在 45#钢、LY-12 铝和有机玻璃等三种材料隔板中的不同位置的到达时间,从而得到隔板不同厚度的冲击波速度和压力。王海福等人^[42]对密实介质中冲击波峰值压力的衰减建立了一个近似的计算模型,并利用该模型分别对铝、钢和有机玻璃等介质中的冲击波衰减特性进行了计算。

1.3 本文主要研究内容

本文研究的主要内容是通过测试理想炸药钝化 RDX 和非理想含铝炸药 RHTL 在与金属介质接触爆炸条件下, 金属板中冲击波参数的分布, 来研究不同炸药在金属板中的衰减规律。本文重点实验研究了不同炸药接触爆炸下, 单层钢板和复合板(前钢后铝)中的冲击波速度的测量, 通过冲击波速度的实验结果来研究不同炸药在金属板中冲击波的衰减规律。本文的主要编写思路主要基于前后的逻辑关系。首先, 通过已知的炸药型号来计算接触爆炸下冲击波的初始参数(第二章), 通过初始参数的计算, 可以理解接触爆炸下冲击波传播到介质的基本情况, 同时为后面的理论计算和实验研究提供相关数据或者参考。紧接着, 研究了一维情况下冲击波在凝聚介质中的衰减规律(第三章), 得到了冲击波参数的解析解, 反映了一定的衰减规律。下面是本文的重点研究内容, 实验研究了不同炸药接触爆炸下, 单层钢板和复合板(前钢后铝)中的冲击波速度的测量, 通过冲击波速度的实验结果来研究不同炸药在金属板中冲击波的衰减规律(第四章), 最后作为总结结束了论文的全部内容(第五章)。

2 爆炸冲击波初始参数的计算

要确定炸药爆炸在周围介质中形成的冲击波的衰减规律及整个作用场的动力学参量,首先必须确定爆炸冲击波的初始参量,它是解决上述问题不可缺少的初始条件。另外,对初始参量进行研究,还可以检验理论的正确性。

2.1 爆压和爆速的计算

2.1.1 主炸药的密度

本课题实验采用的是主药柱为Φ100 mm×50 mm 的钝化 RDX 炸药和 RHTL 炸药(55RDX/24TNT/20A1/1 蜡),所用主药柱的密度列于表 2.1 中。

表 2.1 实验中所用主炸药的密度

炸药编号	RDX-01	RDX-02	RDX-03	RHTL-01	RHTL-02
密度 (g/cm ³)	1.777	1.778	1.778	1.844	1.845

2.1.2 钝化 RDX 的爆速和爆压的计算

2.1.2.1 钝化 RDX 的爆速及爆压计算公式

钝化 RDX 炸药的爆速和爆压的计算采用 1985 年吴雄提出的 ω - Γ 公式^[43-44],既适合于计算单质炸药,又适合于计算混合炸药爆速和爆压,计算结果与实测值相当吻合,近年来也得到了国内外的广泛应用。

(1) 爆速表达式为:

$$\begin{aligned} v_D &= 33.1Q^{1/2} + 243.2\omega\rho_0 \\ Q &= \sum Q_i\omega_i \\ \omega &= \sum \omega_i\omega_i \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中 Q ——混合炸药的爆热或特征热值 (J/g)

ω ——位能因子

ρ_0 ——装药密度 (g·cm⁻³)

Q_i ——组分 i 的爆热或特征热值 (J/g)

ω_i ——组分 i 位能因子

ω_i ——混合炸药中组分 i 的质量分数

(2) 爆压表达式为:

$$p = \frac{\rho_0 v_D^2 \times 10^{-6}}{\gamma + 1} \quad (2-2)$$

式中 p ——爆轰压 (GPa)

γ ——绝热指数

v_D ——爆速 (m/s)

式中的 γ 不能简化为3,而是根据爆轰产物、组分和初始密度求得,即:

$$\gamma = k + \Gamma_0 (1 - e^{-0.546 \rho_0}) \quad (2-3)$$

$$\Gamma_0 = \frac{\sum n_i}{\sum \frac{n_i}{\Gamma_{0i}}} = \frac{\sum \frac{\omega_i}{M_i}}{\sum \frac{\omega_i}{\Gamma_{0i} M_i}} \quad (2-4)$$

式中 $k = c_p/c_v$ (c_p : 定压比热容, c_v : 定容比热容)

Γ_0 --- 总绝热指数

n_i --- 混合炸药中*i*组分物质的量 (mol)

ω_i --- 混合炸药中*i*组分的质量分数

M_i --- 混合炸药中*i*组分的摩尔质量

Γ_{0i} --- 混合炸药中*i*组分的绝热指数

2.1.2.2 计算钝化 RDX 的爆速和爆压

利用(2-1)公式计算钝化 RDX 炸药的爆速,其中钝化 RDX 的组成为: 94%RDX/6%蜡,查文献^[45]可知:

$$Q_{RDX} = 5790 \text{J/g}^{-1} \quad \omega_{RDX} = 14.23$$

$$Q_{\text{蜡}} = 2983 \text{J/g}^{-1} \quad \omega_{\text{蜡}} = 18.60$$

$$Q = \sum Q_i \omega_i = 5263.62 \text{J/g}^{-1}$$

$$\omega = \sum \omega_i \omega_i = 14.4922$$

$$\text{可得爆速: } v_D = 33.1Q^{1/2} + 243.2\omega \rho_0 = 8668.0 \text{m/s}^{-1}$$

利用(2-2)~(2-4)公式计算钝化 RDX 炸药的爆压

$$\text{查文献}^{[45]} \text{可知: } \begin{aligned} \Gamma_0(\text{RDX}) &= 2.65 & M_i(\text{RDX}) &= 222 \\ \Gamma_0(\text{蜡}) &= 3.45 & M_i(\text{蜡}) &= 380 \end{aligned}$$

由(2-4)得:

$$\Gamma_0 = \frac{\sum n_i}{\sum \frac{n_i}{\Gamma_{0i}}} = \frac{\sum \frac{\omega_i}{M_i}}{\sum \frac{\omega_i}{\Gamma_{0i} M_i}} = 2.67$$

由(2-3)得:

$$\gamma = k + \Gamma_0 (1 - e^{-0.546 \rho_0}) = 2.9086$$

由 (2-2) 得爆压:

$$p = \frac{\rho_0 v_D^2 \times 10^{-6}}{\gamma + 1} = 34.178 \text{ GPa}$$

2.1.3 RHTL 炸药的爆速和爆压的计算

2.1.3.1 含铝炸药的爆速及爆压计算公式

含铝炸药的爆速及爆压可以利用计算机编码方程 KHT 及 BKW 计算^[46-50], 也可以采用经验公式, 现按照文献^[8]的方法导出含铝炸药的爆速和爆压得具体表达式:

$$v_D = \varphi_1^{1/2} (A + B \rho_0) \quad (2-5)$$

$$p = 1.358 \varphi_1 \rho_0^2 \left(1 - \omega_M \frac{\rho_0}{\rho_M}\right) \quad (2-6)$$

$$\varphi_1 = 0.4889 [NQ(1 - m_M)]^{1/2} \quad (2-7)$$

式中 v_D --- 爆速 (mm/μs)

p --- 爆压 (GPa)

φ_1 --- 代表含铝炸药组成及能量的示性数

N --- 每克炸药所产生的气体爆炸产物的物质的量 (mol/g)

Q --- 每克炸药的爆炸反应热 (J/g)

m_M --- 每克炸药爆炸产物中 Al_2O_3 的质量分数

ρ_0 --- 装填密度 (g/cm³)

ρ_M --- 铝粉的密度 (g/cm³)

ω_M --- 含铝炸药中铝粉的质量分数

A、B --- 常数, 对压装及注装含铝炸药 A=1; 压装含铝炸药 B=1.25;

注装含铝炸药 B=1.15; 压装含高氯酸盐的含铝炸药 B=1.05。

对于 1kg 的 $\text{C}_6\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_9\text{Al}_2$ 含铝炸药,

$$N = \frac{6a + 2b + 2c - 2d + 3e}{4000} \quad (2-8)$$

$$Q = \frac{174.45a - 284.91d - 409.86e}{1000} - \sum_{i=1}^n n_i \Delta H_{f,i}^0 \quad (2-9)$$

$$m_M = \frac{51e}{1000} \quad (2-10)$$

2.1.3.2 计算含铝 RHTL 炸药的爆速和爆压

利用 (2-5)~(2-10) 公式计算含铝 RHTL 炸药的爆速和爆压

(1) 炸药各组分的基本参数 (见下表 2.2)

表 2.2 炸药各组分的基本参数

组分	分子式	$\rho_T/g\cdot cm^{-3}$	$O.B \times 100$	$\Delta H_{f,0}^0/kJ\cdot mol^{-1}$	1kg 炸药中各组分物质的量/mol
RDX	$C_3H_6N_6O_6$	1.816	-21.6	61.50	2.477
TNT	$C_7H_5N_3O_6$	1.654	-74.0	-52.21	1.057
Al	Al	2.7	-89.0	0.00	7.407
石蜡	$C_{18}H_{38}$	0.9	-346	-558.56	0.039

(2) 炸药化学式 由表列数据可得 1kg 炸药的化学式为



(3) 理论密度

$$\rho = 1.8756 \text{ g/cm}^3$$

(4) 爆速 由式 (2-8) - (2-10) 得

$$N=0.03808 \quad Q=-6442.9 \text{ J/g}$$

$$m_M = 0.377 \quad \varphi_1 = 6.0405$$

$$\text{且 } A=1, \quad B=1.15$$

代入式 (2-5) 得含铝 RHTL 炸药爆速为

$$v_D = \varphi_1^{1/2} (A + B\rho_0) = 7.672 \text{ mm/}\mu\text{s}$$

(5) 含铝 RHTL 炸药的爆压 由式 (2-6) 得

$$p = 1.358\varphi_1\rho_0^2 \left(1 - \omega_M \frac{\rho_0}{\rho_M}\right) = 24.1 \text{ GP}$$

2.2 接触爆炸冲击波初始参量

2.2.1 垂直入射时的初始参量

分界面处冲击波初始参量计算的基本假设^[51]:

1. 过程是一维的 (平面波);
2. 取波阵面的一小段来展宽研究, 初始参量计算的模型如图 2.1。

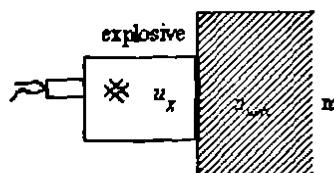


图 2.1 初始参量计算的模型

当波前质点速度 $u_0 = 0, p_0 = 0$ 时, 则波后压力为 $p = \rho_0 D u$, 所以 $u = \frac{p}{\rho_0 D}$

其中: ρ_0 ——材料的密度, D ——冲击波波速, $\rho_0 D$ ——材料的冲击阻抗。

对于炸药爆轰而言: $u_H = \frac{p_H}{(\rho_0 D)_e}$;

对冲击波在介质 m 中传播: $u_m = \frac{p_m}{(\rho_0 D)_m}$ 。

当 $u_m = u_H$ 时不反射波,

当 $(\rho_0 D)_m < (\rho_0 D)_e$ 时, 则有 $u_H < u_m$, 反射稀疏波, 故有 $p_x < p_H$, 反射后, $u_{mx} = u_x$

当 $(\rho_0 D)_m > (\rho_0 D)_e$ 时, 则有 $u_H > u_m$, 反射冲击波, 故界面压力 $p_x > p_H$ 。界面连续条件依然存在。

下面就这些情况进行讨论:

(1) $p_x < p_H$ 的情形 (反射稀疏波)

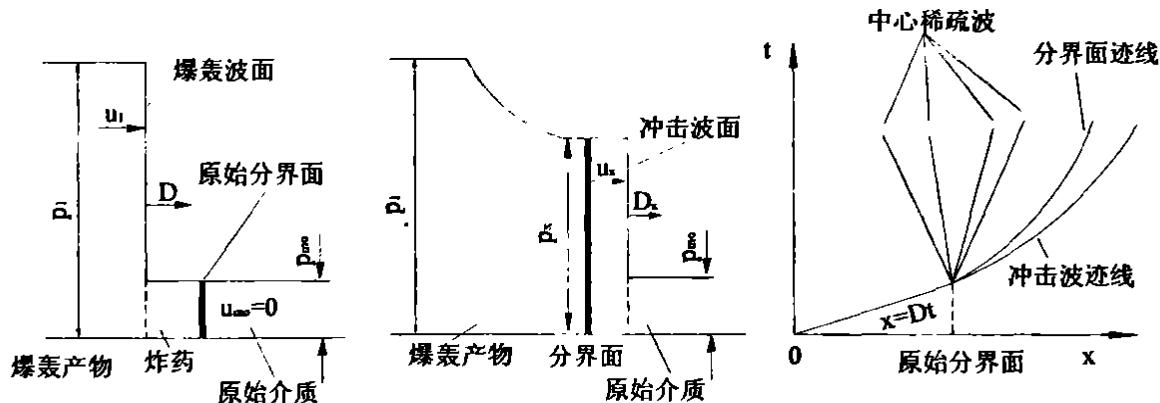


图 2.2 接触爆炸下反射稀疏波的情况

当爆轰波达到初始界面时, 将向产物中传播左传稀疏波, 有

$$u_x = u_H - \int_{p_H}^{p_x} \frac{1}{\rho a} dP = u_H - \int_{p_H}^{p_x} \frac{1}{a_H \left(\frac{p}{p_H}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \rho_H \left(\frac{p}{p_H}\right)^{\frac{1}{\gamma}}} dp$$

对上式进行积分。并代入 a_H, ρ_H 的表达式, 得到:

$$u_x = \frac{D}{\gamma+1} \left\{ 1 + \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_x}{p_H} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] \right\} \quad (2-11)$$

同时, 在介质中, 由界面连续条件得到:

$$u_{mx} = u_x = \sqrt{(p_{mx} - p_{m0})(v_{m0} - v_{mx})} = \sqrt{(p_x - p_{m0})(v_{m0} - v_{mx})} \quad (2-12)$$

如介质的状态方程可以写成:

$$p_{mx} = \varphi(v_{mx}) \quad (2-13)$$

则根据式 (2-11) – (2-13) 可以确定作用后状态量 p_x, u_x, v_{mx} ，然后由冲击波关系式得到 D_{mx} 。在一维介质中，平面冲击波的关系为:

$$p_x = \rho_{m0} D u_x \quad (2-14)$$

如能知道状态方程 $D \sim u_x$ 的关系，则结合式 (2-11)、(2-12) 也可以求出 p_x, u_x 。

(2) 反射冲击波，即 $p_x > p_H$ 的情形

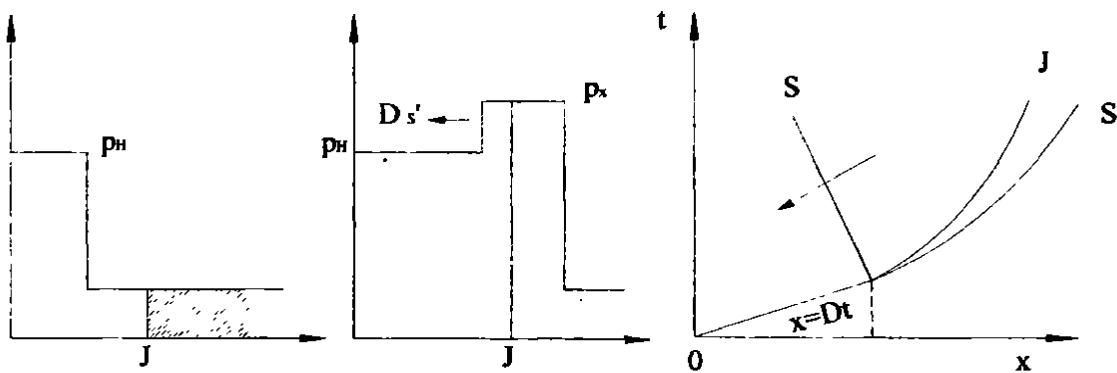


图 2.3 接触爆炸下反射冲击波的情况

当爆轰达到界面时，将反射左传冲击波。假定 $\pi = \frac{p_x}{p_H}$ ，有

$$u_x = u_H - \sqrt{(p_x - p_H)(v_H - v_x)} = u_H - \sqrt{p_H v_H (\pi - 1) \left(1 - \frac{v_x}{v_H}\right)} \quad (2-15)$$

$$\text{又 } \frac{v_H}{v_x} = \frac{\rho_x}{\rho_H} = \frac{(\gamma+1)p_x + (\gamma-1)p_H}{(\gamma-1)p_x + (\gamma+1)p_H} = \frac{(\gamma+1)\pi + (\gamma-1)}{(\gamma-1)\pi + (\gamma+1)} \quad (2-16)$$

将式 (2-16) 代入式 (2-15) 中，得到:

$$u_x = \frac{v_D}{\gamma+1} \left[1 - \frac{(\pi-1)\sqrt{2\gamma}}{\sqrt{(\gamma+1)\pi + (\gamma-1)}} \right] \quad (2-17)$$

$$\text{同样地介质中有: } u_{mx} = u_x = \sqrt{(p_{mx} - p_{m0})(v_{m0} - v_{mx})} \quad (2-18)$$

若状态方程为: $p_{mx} = \varphi(v_{mx})$ ，则可由式 (2-14)、(2-17)、(2-18) 求出 u_x, p_x, v_{mx} 。

2.2.2 接触爆炸时 45#钢中冲击波初始参量的计算

2.2.2.1 钝化 RDX 炸药接触爆炸时 45#钢中冲击波初始参量的计算

本课题钝化 RDX 炸药的密度, 爆速, 爆压由 2.1 节计算所知:

$$v_D = 8668.0 \text{ m/s} \quad p = 34.178 \text{ GPa}$$

由 (2-14) 和 (2-17) 可知

$$p_{mx} = p_x = \rho_{m0}(c_0 + \lambda u_{mx})u_{mx}$$

$$u_{mx} = u_x = \frac{v_D}{\gamma + 1} \left[1 - \frac{(\gamma - 1)\sqrt{2\gamma}}{\sqrt{(\gamma + 1)\pi + (\gamma - 1)}} \right]$$

用图解法求爆炸冲击波初始参数, 由以上两个方程作图。

对于 45#钢: $\rho_{m0} = 7.85 \text{ g/cm}^3$, $c_0 = 3.574 \text{ km/s}$, $\lambda = 1.92$, 将所有数据代入以上两式, 分别得到

$$p_{mx} = p_x = 7.850 \times (3.574 + 1.92u_{mx})u_{mx}$$

$$u_{mx} = u_x = 2217.67 \times \left[1 - \frac{2.412 \left(\frac{p_{mx}}{34.178 \times 10^9} - 1 \right)}{\sqrt{\frac{p_{mx}}{34.178 \times 10^9} \times 3.9086 + 1.9086}} \right]$$

将第一式 $p_{mx} - u_{mx}$ 数据列于下表 2.3, 将第二式 $p_{mx} - u_{mx}$ 数据列于下表 2.4

表 2.3 钝化 RDX 接触爆炸 45#钢中冲击波参数 $p_{mx} - u_{mx}$ 数据

$u_{mx} / (\text{m/s}^{-1})$	200	400	600	750	900	1000	1200
p_{mx} / GPa	6.21	13.63	22.26	29.52	37.45	43.13	55.37

表 2.4 钝化 RDX 接触爆炸 45#钢中冲击波参数 $p_{mx} - u_{mx}$ 数据

$u_{mx} / (\text{m/s}^{-1})$	4921.9	3944.3	3101.5	2534.8	2011.3	1682.1	1062.3
p_{mx} / GPa	6.21	13.63	22.26	29.52	37.45	43.13	55.37

将上面两表数据分别在 $p-u$ 平面作图 (图 2.4), 两曲线之交点坐标值即为所求冲击波初始参数 u, p 。

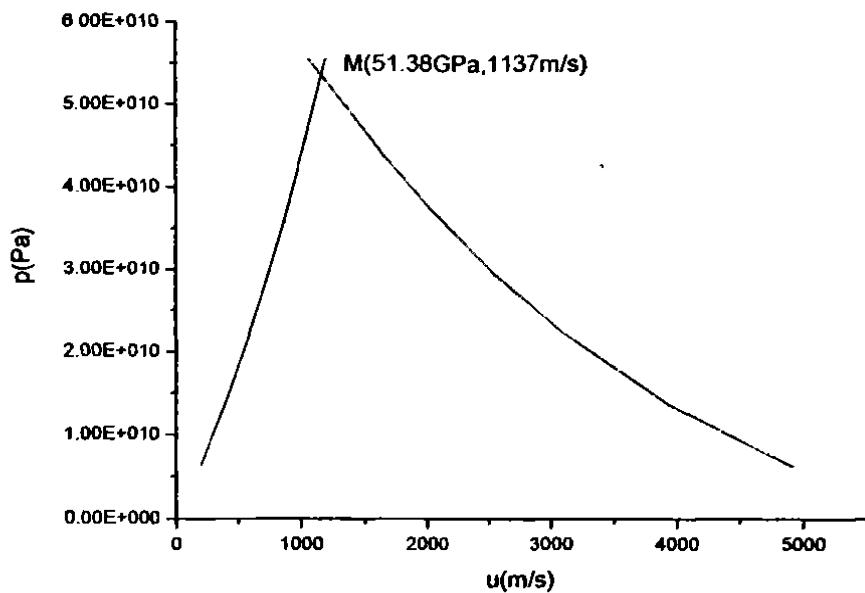


图 2.4 钝化 RDX 炸药接触爆炸时 45# 钢中 p-u 曲线

由图上两条曲线交点 M 的坐标值就是钝化 RDX 在 45# 钢接触爆炸时的初始参数

$$p_{mx} = 51.38 \text{ GPa}$$

$$u_{mx} = 1137 \text{ m/s}$$

2.2.2.2 含铝 RHTL 炸药接触爆炸时 45# 钢中冲击波初始参量的计算

本文含铝 RHTL 炸药的爆速，爆压由 2.1 节计算所知：

$$v_D = 7672 \text{ m/s} \quad p = 24.1 \text{ GPa}$$

由 (2-14) 和 (2-17) 可知

$$p_{mx} = p_x = \rho_{m0} (c_0 + \lambda u_{mx}) u_{mx}$$

$$u_{mx} = u_x = \frac{v_D}{\gamma + 1} \left[1 - \frac{(\pi - 1)\sqrt{2\gamma}}{\sqrt{(\gamma + 1)\pi + (\gamma - 1)}} \right]$$

用图解法求爆炸冲击波初始参数，由以上两个方程作图

对于 45# 钢： $\rho_{m0} = 7.85 \text{ g/cm}^3$ ， $c_0 = 3.574 \text{ km/s}$ ， $\lambda = 1.92$ ，将所有数据代入以上两式，分别得到

$$p_{mx} = p_x = 7.850 \times (3.574 + 1.92 u_{mx}) u_{mx}$$

$$u_{mx} = u_x = 1720.18 \times \left[1 - \frac{2.412 \left(\frac{p_{mx}}{24.1 \times 10^9} - 1 \right)}{\sqrt{\frac{p_{mx}}{24.1 \times 10^9} \times 4.466 + 2.466}} \right]$$

将第一式 $p_{mx} - u_{mx}$ 数据列于下表 2.5, 将第一式 $p_{mx} - u_{mx}$ 数据列于下表 2.6

表 2.5 含铝 RHTL 炸药接触爆炸 45#钢中冲击波参数 $p_{mx} - u_{mx}$ 数据

$u_{mx} / (m/s)$	200	400	600	750	900	1000	1200
p_{mx} / GPa	6.21	13. 63	22. 26	29. 52	37. 45	43. 13	55. 37

表 2.6 含铝 RHTL 炸药接触爆炸 45#钢中冲击波参数 $p_{mx} - u_{mx}$ 数据

$u_{mx} / (m/s)$	4921. 9	3944. 3	3101. 5	2534. 8	2011. 3	1682. 1	1062. 3
p_{mx} / GPa	6.21	13. 63	22. 26	29. 52	37. 45	43. 13	55. 37

将上面两表数据分别在 $p-u$ 平面作图 (图 2.5), 两曲线之交点坐标值即为所求冲击波初始参数 u, p 。

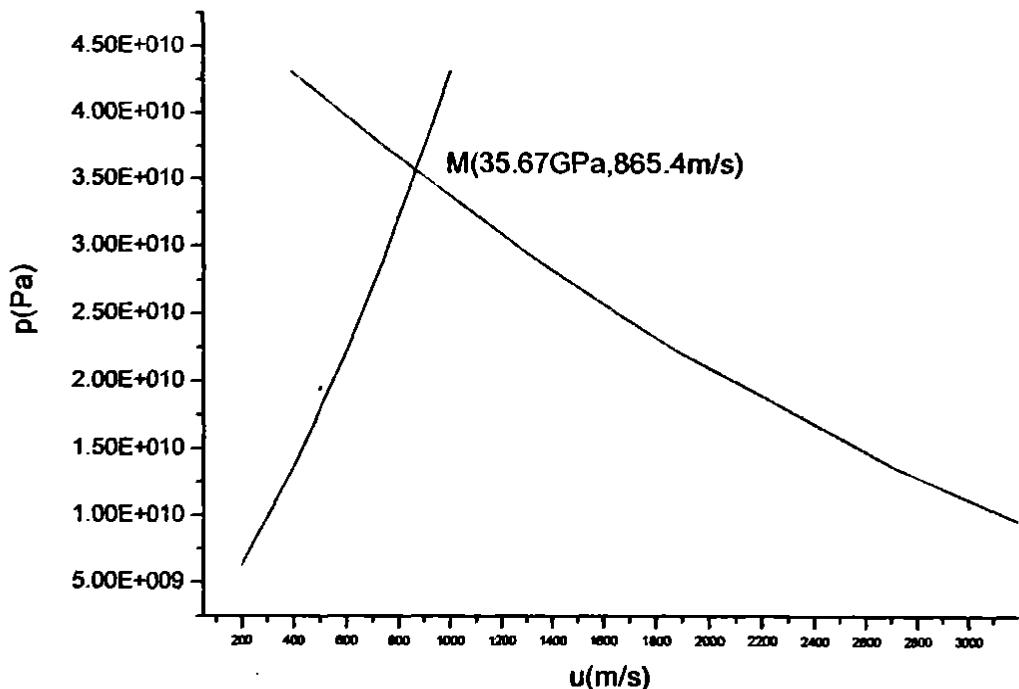


图 2.5 含铝 RHTL 炸药接触爆炸时 45 钢中 $p-u$ 曲线

由图 2.5 上两条曲线交点 M 的坐标值就是含铝炸药 RHTL 在 45 钢接触爆炸时的

初始参数：

$$p_{mx} = 35.67 \text{ GPa}$$
$$u_{mx} = 865.4 \text{ m/s}$$

2.3 本章小节

本章主要进行了接触爆炸下金属介质中冲击波的初始参量的计算, 确定爆炸冲击波的初参量是计算介质中冲击波作用场动力学参量的初始条件, 是本文理论和实验研究冲击波衰减规律的前提条件。在冲击波初始参数的求解过程中, 由于本文主要研究的介质是 45#钢, 因此在爆炸产物中反射冲击波, 其次研究了冲击波垂直入射时介质中冲击波的初始参数的计算公式以及用作图法计算冲击波的初始参数。从而计算了钝化 RDX 炸药和含铝 RHTL 炸药接触爆炸时 45#钢中冲击波的初始参量。

3 凝聚介质中冲击波的衰减规律理论研究

本章理论研究了凝聚介质中冲击波衰减的规律。本章从最基本的凝聚介质的冲击波关系式，即实验冲击波关系式和实用状态方程时的冲击波关系式，一直到等熵方程的概念。理论研究得出了冲击波的衰减规律；通过比较理论结果和实验结果可以看出两种结果吻合得比较好，从而验证了实验和理论研究的正确性。

3.1 凝聚介质的冲击波关系式

3.1.1 实验关系式

在凝聚介质中冲击波的速度 D 与其波后质点速度 u 之间，在相当宽的速度范围（或压力范围）内存在着线性关系^[52]

$$D = c_0 + \lambda u \quad (3-1)$$

其中 c_0 及 λ 是常数。美国 Los Alamos 国家实验室和 Lawrence Livermore 国家实验室对大量物质进行了系统的测试，获得了详尽的数据^[53-55]。文献给出了部分物质的雨贡纽参数^[56]。

对于凝聚介质，即使冲击波不强，其波后压力和比内能都远大于该物质正常状态时对应的值。所以，当冲击波波前处于正常状态时，可以认为 $p_0 = e_0 = 0$ ，并设波前是静止状态， $u_0 = 0$ ，这时，冲击波的基本关系式为

$$\rho(D - u) = \rho_0 D \quad (3-2)$$

$$p = \rho_0 D u \quad (3-3)$$

除以上两个基本关系式外，还增加了一个关系式(3-1)。但是，这并非又增加了一个独立的冲击波关系式，实际上，它可视为一个表征物质性质的关系式，起着类似状态方程的作用，只不过状态方程是描述物质热力学量之间的关系，而(3-1)式则是表达物质的运动量之间的关系。所以，当利用了关系式(3-1)式后，就得到了与具体物质有关的冲击波关系式，在这里即凝聚介质的冲击波关系式。

3.1.2 凝聚介质采用实用状态方程时的冲击波关系式

对凝聚介质可采用实用状态方程

$$p = c_0(\rho - \rho_0) + (\gamma - 1)\rho e \quad (3-4)$$

其中 c_0 是正常态时的声速，可取(3-1)式中的常数 c_0 作为其近似值，系数 γ 由(3-5)式决定

$$\gamma = 4\lambda - 2\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_H}\right)\lambda^2 - 1 \quad (3-5)$$

其中 ρ_H 是冲击波上的密度。在许多情况下、可将 γ 近似取为常数：

$$\gamma = 2\lambda - 1 + \sqrt{(2\lambda - 1)^2 - 1} \quad (3-6)$$

可见，利用实验关系式 (3-1) 就可确定此状态方程中的系数 γ 及 c_0 。

当采用此状态方程时，经过推导可得到凝聚介质冲击波关系式的各种表达式，若以冲击波速度 D 为参量，则冲击波的三个关系式可写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{u}{c_0} &= \frac{2}{\gamma + 1} \left(\frac{D}{c_0} - \frac{c_0}{D} \right) \\ \frac{\rho}{\rho_0} &= \frac{(\gamma + 1)D^2}{(\gamma - 1)D^2 + 2c_0^2} \\ \frac{p}{p_*} &= \frac{2}{\gamma + 1} \left(\frac{D^2}{c_0^2} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (3-7)$$

其中 $p_* = \rho_0 c_0^2$ ，可视为一种特征压力。相应地，用(3-1)式代入 (3-7) 式的第一式消去 u ，可将 γ 的表达式写为

$$\gamma = 2\lambda \left(1 + \frac{c_0}{D} \right) - 1 \quad (3-8)$$

一旦冲击波速度 D 给定， γ 就为已知，由 (3-7) 式就可求出冲击波上的其他各量。

3.1.3 等熵方程

假设 γ 实际上只依赖于熵，即当熵不变时， γ 也不变。在这种假设下，容易求出实用状态方程 (3-4) 所对应的等熵方程。根据热力学第一定律，等熵方程 $dS=0$ 的一般形式为

$$\frac{de}{d\rho} = p / \rho^2 \quad (3-9)$$

用状态方程 (3-4) 代入上式，并考虑到这时 γ 是常数，求积分就得到

$$e = K\rho^{\gamma-1} - c_0^2 \left(\frac{1}{\gamma-1} - \frac{\rho_0}{\gamma\rho} \right) \quad (3-10)$$

其中 K 是积分常数。它依赖于熵 $K=K(S)$ 。此式是等熵过程中的内能关系式。将它代入 (3-4) 式就得到等熵状态方程

$$p = A\rho^r - \rho_0 c_0^2 / \gamma \quad (3-11)$$

其中 $A = (\gamma - 1)K = A(S)$ 是熵的函数。取定一个熵 S 的值, 此方程就给出一条该 S 的等熵线。容易写出通过常态点的 $S=S_0$ 等熵线, 在正常态点处 $\rho = \rho_0, p = 0$, 由 (3-5) 得知, 此时

$$\gamma = \gamma_0 = 4\lambda - 1 \quad (3-12)$$

并由 (3-11) 式得 $A(S_0) = \rho_0^{1-r} c_0^2 / \gamma_0$, 于是, $S=S_0$ 等熵线为

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma_0} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{r_0} - 1 \right] \quad (3-13)$$

利用等熵方程容易求出等熵声速

$$c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_S = \gamma A \rho^{r-1} = \gamma \frac{p}{\rho} + \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho} \quad (3-14)$$

在一般情况下, 当不知道等熵方程时, 可直接利用状态方程来求声速。

所得的等熵方程和声速的表达式与理想气体的等熵方程和声速式在形式上很相似。以后将看到, 当凝聚介质有这些形式简单的表达式后, 一些问题可以求出解析解。

现在来考察所得等熵方程的合理性和精度, 同时也是对关于 γ 只依赖于熵的假设的检验。设介质先受到冲击压缩, 冲击波过后介质继续作等熵运动(或等熵膨胀或等熵压缩)。根据此冲击波的 ρ_H 由(3-5)式定出 γ 值, 它就是随后的等熵运动中使用的方程 (3-11) 所对应的 γ ; 同时根据 ρ_H 和 p_H 定出该方程中的 A 值, 然后就用该方程计算等熵膨胀和等熵压缩的过程。李维新等人^[1]对多种金属多种冲击波强度(也就是多种熵值)进行了这样的计算, 列出了铝和铁两种介质的部分计算结果, 冲击波强度给出两种: $p_H = 0.4$ 和 0.8×10^2 GPa(百万大气压)。等熵膨胀过程由 ρ_H 一直膨胀到 $\rho = \rho_0$, 等熵压缩过程由 p_H 继续加压到 $p \approx 2.0 \times 10^2$ GPa 左右。从计算的结果比较看到, 等熵方程的解析表达式(3-11)与差分方程的结果符合得很好。例如, 对于铝被 $p_H = 80$ GPa, $\rho_H / \rho_0 = 1.48$ 冲击波压缩后, 再继续进行等熵压缩到 $\rho / \rho_0 = 2.039$ 时(压力已高达

266GPa), 两种方程算得的压力相差小于 5%。

3.2 凝聚介质中冲击波的衰减规律

3.2.1 凝聚介质中冲击波的衰减的公式推导^[1]

炸药爆轰产物的加载将在凝聚介质中产生冲击波, 在波后或边侧稀疏作用下, 或因波阵面熵增、粘性阻尼损耗以及与应变率有关的本构关系等原因, 冲击波在传播中发生衰减, 波速和波头压力下降, 逐渐退化为应力波甚至声波。本文只考虑介质中因爆轰引起的冲击波的流体动力学衰减, 即因其背后稀疏波引起的衰减。

凝聚介质中冲击波受其波后传来的稀疏波作用而衰减的过程, 利用冲击波速度与波后质点速度间的线性关系式, 并假设衰减过程是等熵的。此问题可以求得一维解析解。

设介质的初始状态为 p_0 、 ρ_0 、 c_0 、 $u_0 = 0$, 其左端被一活塞以常速 U 推着向右运动, 于是介质内将产生一冲击波向右运动, 冲击波速度也将是常速, 记作 D_0 。根据凝聚介质的性质, 由(3-1)式知

$$D = c_0 + \lambda u \quad (3-15)$$

式中 u 是冲击波后介质的质点速度, 在这里它等于活塞速度, c_0 是介质的初始声速, λ 是实验常数。

现设活塞运动到 $x = 0$ 处突然停止运动, 将此时刻取为 $t=0$ 。于是, 从坐标原点 $(0, 0)$ 将发出一中心稀疏波, 该波的波头在 (x_1, t_1) 点追上冲击波(图 3.1)。从此以后冲击波将受到稀疏波的作用而不断衰减。在 (x, t) 平面上可划分成几个不同的流动区域, 如图 3.1 所示, 区域(0)是未扰动区, 区域(I)是冲击波波后常态区, 区域(II)是稀疏波区。下面分区求解。

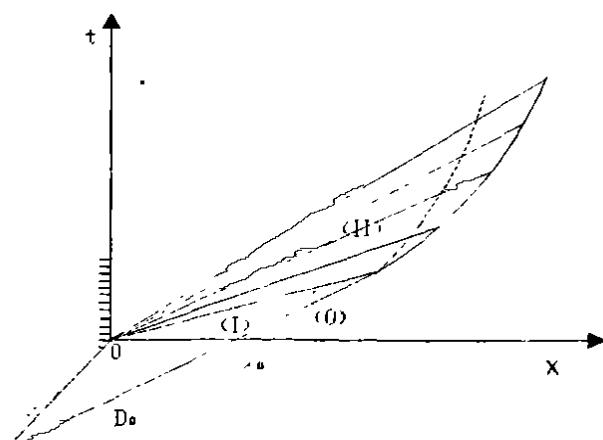


图 3.1 冲击波的衰减过程

(1) 区域(I)

因活塞速度 U 为常数, 从而冲击波速度 D_0 也为常数、故波后区域(I)是一个常态区. 由公式 (3-2)、(3-3)、(3-8) 和 (3-14) 得到其解为

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \rho_0 \frac{D_0}{D_0 - U} \\ \gamma &= 2\lambda\left(1 + \frac{c_0}{D_0}\right) - 1 \\ c_1 &= \sqrt{\gamma \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho_1}}\end{aligned}\quad (3-16)$$

其中 γ 是凝聚介质实用状态方程中的系数。

(2) 区域(II)

这是一个向前中心稀疏波区。波前是常态区(I), 波内各处的黎曼不变量 β 为同一常数, 等于区域(I)的 β_1 , 即 $\beta = \beta_1$ 。 C_+ 族特征线是直线, 其中心点为(0, 0)。于是, 容易写出其解为

$$\left. \begin{aligned} x &= (u + c)t \\ u - \frac{2}{\gamma - 1}c &= u_1 - \frac{2}{\gamma - 1}c_1 \end{aligned} \right\} \quad (3-17)$$

为了下面的需要. 我们再求出此稀疏波在拉格朗日坐标系中的解。现引进拉格朗日坐标为:

$$m = \int_0^t \rho_0 dx = \rho_0 x \quad (3-18)$$

在 (m, t) 坐标系中, C_+ 和 C_- 两族特征线的关系式为

$$\left. \begin{aligned} C_+ : \frac{dm}{dt} &= \rho c = K & \alpha = u - \int_0^t K d\tau = \text{const} \\ C_- : \frac{dm}{dt} &= -\rho c = -K & \beta = u + \int_0^t K d\tau = \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (3-19)$$

其中 $K = \rho c$ 是声阻抗, $K = c(\tau)/\tau = K(\tau)$, τ 是比容。如上所述, 在整个稀疏波区内 $\beta = \beta_1 = \text{const}$, 而沿每一条 C_+ 特征线 u, τ, K 都是常数。对 C_+ 求积分, 考虑到这里各条 C_+ 仍通过 $(0, 0)$ 点, 于是得到 C_+ 族特征线的方程为

$$\frac{m}{t} = K = \rho c \quad (3-20)$$

每一 K 值就对应一条 C_+ 直线。此式再连同 $\beta = \beta_1 = \text{const}$ 就给出 (m, t) 坐标系中区域(II)的解。

(3) 冲击波轨迹

当稀疏波在 (x_1, t_1) 点赶上冲击波后, 冲击波开始衰减, 这时其波后状态在 (u, p) 平面上将沿 $p-u$ 形式的雨贡纽曲线 H 自 (u_1, p_1) 点开始往下变化(图 3.2)。已知雨贡纽曲线与等熵线在初始点处两阶相切, 故在一定压力范围内, 这两曲线非常接近。现假定, 在我们所分析的问题中, 可以认为雨贡纽曲线与等熵线相重合, 即状态自 (u_1, p_1) 点往下沿雨贡纽的变化可以用沿等熵线的变化代替。这一假定相当于冲击波在衰减过程中熵的变化可忽略不计, 即可认为衰减过程是一等熵过程。冲击波的衰减不会影响区域(II)中解的性质。于是, 原稀疏波的解一直到冲击波面上都成立。

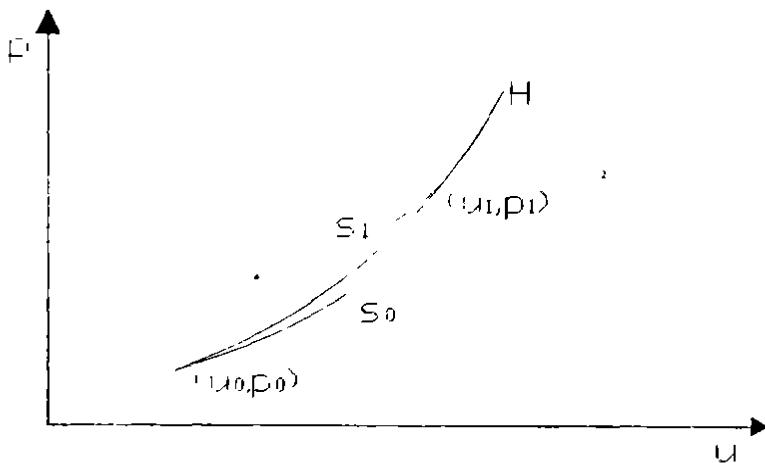


图 3.2 冲击波及简单波的 $p-u$ 曲线

在衰减过程中冲击波轨迹的方程为

$$\frac{dx}{dt} = D \quad (3-21)$$

这里冲击波速度 D 是 t 的函数。利用(3-18)式, 此式可写为

$$\frac{dm}{dt} = \rho_0 D \quad (3-22)$$

另外, 由(3-20)式有

$$\frac{dm}{dt} = K + t \frac{dK}{dt} \quad (3-23)$$

按上面的假定, 区域(II)的解(3-20)式在冲击波上是成立的, 于是, 用(3-23)式代入冲击波方程(3-22)式得

$$t \frac{dK}{dt} = \rho_0 D - K \quad (3-24)$$

在区域(II)中 $\beta = \text{const}$, 即有

$$du - \frac{dp}{\rho c} = 0 \quad \text{或} \quad \frac{dp}{du} = \rho c = K \quad (3-25)$$

另一方面，冲击波有关系式

$$\left. \begin{aligned} D &= c_0 + \lambda u \\ p &= \rho_0 D u = \rho_0 (c_0 + \lambda u) u \end{aligned} \right\} \quad (3-26)$$

由此可得

$$\frac{dp}{du} = \rho_0 (c_0 + 2\lambda u) \quad (3-27)$$

于是得到

$$K = \rho_0 (c_0 + 2\lambda u) \quad (3-28)$$

或者

$$\rho_0 D - K = -\frac{1}{2} (K - \rho_0 c_0)$$

再用 (3-28) 式置换此式的 u ，得

$$t \frac{dK}{dt} = -\frac{1}{2} (K - \rho_0 c_0) \quad (3-29)$$

对此式求积分，初始条件为 $t = t_1$ 时， $K = K_1$ ，积分得

$$\frac{K - \rho_0 c_0}{K_1 - \rho_0 c_0} = \left(\frac{t}{t_1} \right)^{-1/2} \quad (3-30)$$

利用 (3-20) 及 (3-18) 式得 $K = \rho_0 x/t$ ，将它代入上式并经化简，就得到冲击波的轨迹

$$x = c_0 t + (x_1 - c_0 t_1) \left(\frac{t}{t_1} \right)^{1/2} \quad (3-31)$$

其中 x_1 及 t_1 是稀疏波波头 $x = (u_1 + c_1)t$ 与冲击波初期常速运动段的轨迹 $x = x_0 + D_0 t$ 的交点，即稀疏波追上冲击波的地点和时间，这里 x_0 是 $t = 0$ 时刻冲击波的位置。这两个式子联立求解得

$$\begin{aligned} t_1 &= x_0 / (u_1 + c_1 - D_0) = 1.18 \times 10^{-6} \text{ s} \\ x_1 &= x_0 + D_0 t_1 = 0.00862 \text{ m} \end{aligned} \quad (3-32)$$

对 (3-31) 式求微商，就得冲击波衰减过程中的速度

$$D = c_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_1 - c_0}{t_1} \right) \left(\frac{t_1}{t} \right)^{1/2} \quad (3-33)$$

由 (3-31) 可得

$$\left(\frac{t}{t_1}\right)^{1/2} = \frac{(c_0 t_1 - x_1) + \sqrt{(x_1 - c_0 t_1)^2 + 4 c_0 t_1 x}}{2 c_0 t_1} \quad (3-34)$$

将 (3-34) 代入 (3-33) 得

$$D = c_0 + \frac{c_0(x_1 - c_0 t_1)}{(c_0 t_1 - x_1) + \sqrt{(x_1 - c_0 t_1)^2 + 4 c_0 t_1 x}} \quad (3-35)$$

此式表示冲击波速度 D 随介质的位置 x 的衰减情况；其中 (3-31) 和 (3-33) 式中的 $t \geq t_1$ ，也就是 (3-35) 式中的 $x \geq x_1$ 。

3.2.2 钝化 RDX 作用于 45# 钢时冲击波的理论衰减规律

结合第二章计算的初始参量以及 45# 钢的相关参数计算冲击波的衰减，其中， $u_1 = 1137 \text{ m/s}$ ， $p_1 = 51.38 \text{ GPa}$

由 (3-1) 计算得：

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \rho_0 \frac{D_0}{D_0 - U} = 9781.9 \text{ kg/m}^3 \\ \gamma &= 2\lambda\left(1 + \frac{c_0}{D_0}\right) - 1 = 4.59 \\ c_1 &= \sqrt{\gamma \frac{p_1 + \rho_0 c_0^2}{\rho_1}} = 6139.36 \text{ m/s} \end{aligned}$$

取 $x_0 = 0.0018 \text{ m}$ ，因此由 (3-32) 式可知

$$\begin{aligned} t_1 &= x_0 / (u_1 + c_1 - D_0) = 1.18 \times 10^{-6} \text{ s} \\ x_1 &= x_0 + D_0 t_1 = 0.00862 \text{ m} \end{aligned}$$

由以上公式推导可知：在 $t \geq t_1$ ，即 $x \geq x_1$ 时，中心稀疏波才追赶上冲击波，由此引起冲击波速度的衰减，在追赶上之前，我们只考虑冲击波是一维情况，冲击波可以认为不衰减，因此在 $x = 0.00862 \text{ m}$ 之后冲击波才衰减，由公式 (3-35) 计算出结果和根据第四章的实验结果可以绘制图 3.3 (图中“S-”实验值、图中“L-”理论计算值)。

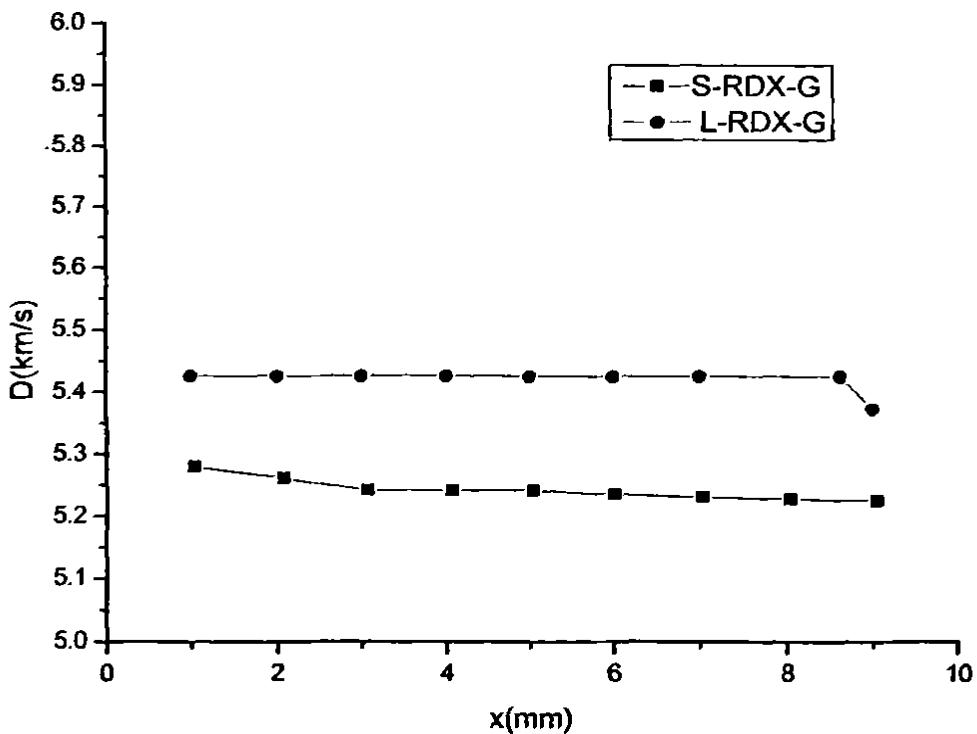


图 3.3 钝化 RDX 作用 45#钢冲击波速度-位置的关系

图 3.3 表示钝化 RDX 作用 45#钢时冲击波速度衰减情况, 给出了理论计算和实验两种情况下的衰减趋势, 从图上可以看出在理论情况下冲击波速度要高于实验结果, 同时在 $x = 0.00862m$ 以前理论计算的冲击波衰减要比实验的慢, 这是由于理论计算的结果是在一维等熵的前提下计算出来的, 而且仅仅考虑界面后的中心稀疏波的追赶而衰减的情况; 实验的结果受更多的因素的影响, 例如侧向稀疏波, 介质的应变和应变速率等等复杂因素的影响。从整个衰减的趋势和误差来看, 理论计算的结果和实验的结果吻合得还是相当好的。

根据 (3-3) 式 $p = \rho_0 D u$ 和 (3-15) 式 $D = c_0 + \lambda u$ 两式联立 (3-35) 可以得出 p-x 的关系, 同时根据第四章的实验结果 (钝化 RDX 作用于钢板冲击波压力衰减的关系) 可以绘制图 3.4 (图中 “S-” 实验值、图中 “L-” 理论计算值)。

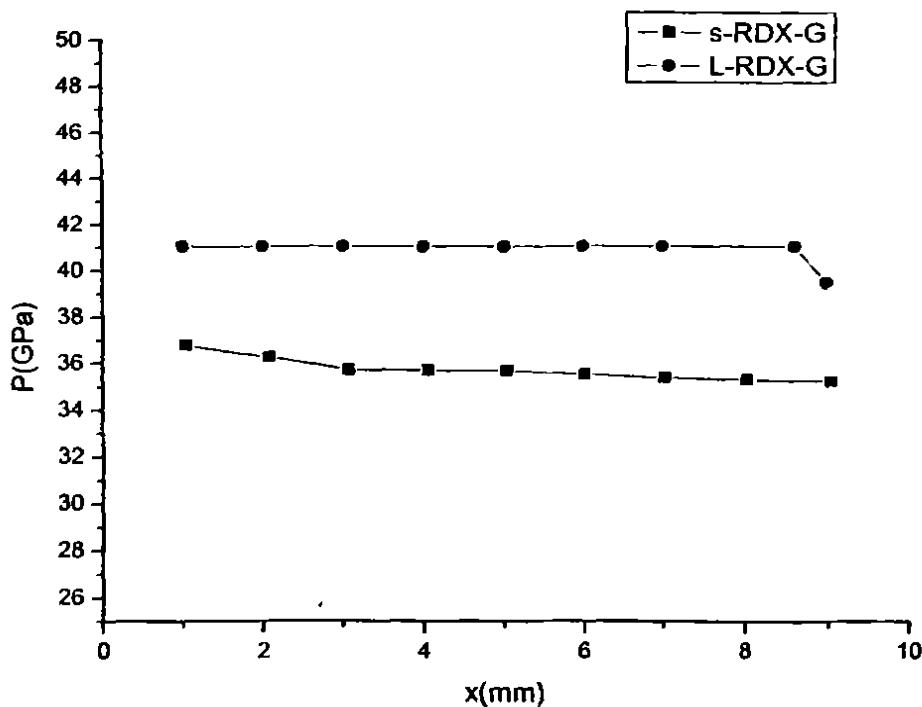


图 3.4 钝化 RDX 作用 45#钢冲击波压力-位置的关系

图 3.4 表示钝化 RDX 作用 45#钢时冲击波压力衰减情况, 给出了理论计算和实验两种情况下的衰减趋势, 从图上可以看出在理论情况下冲击波压力要高于实验结果, 同时理论计算的冲击波压力衰减要比实验的慢, 这是由于理论计算的结果是在一维等熵的前提下计算出来的, 而且仅仅考虑界面后的中心稀疏波的追赶而衰减的情况; 实验的结果受更多的因素的影响, 例如侧向稀疏波, 介质的应变和应变率等等复杂因素的影响。这里的原因和冲击波速度衰减的原因基本上一致, 从图上的比较来看, 理论计算和实验结果衰减的基本趋势吻合得相当好。

3.3 本章小节

本章主要对凝聚介质中冲击波衰减的规律进行了理论研究。本章从最基本的凝聚介质的冲击波关系式, 即实验冲击波关系式和实用状态方程时的冲击波关系式, 一直到等熵方程的概念。从等熵方程的概念可以看出当凝聚介质中的冲击波简化为比较简单的形式, 即一维等熵变化时, 可以求出冲击波相关参数的一维解析解。李维新等人^[1]对多种金属多种冲击波强度(也就是多种熵值)进行了计算, 从大量的计算结果可以看出等熵方程的解析表达式与差分方程的结果符合得很好, 因此在推导凝聚介质中冲击波衰减相关冲击波参数的公式的时候, 可以近似看成是等熵变化的。为了求出解析解, 我们在理论求解的过程中, 假设冲击波的衰减是一维变化的, 从而通过理论研究

得出了冲击波相关参数的衰减公式，利用这些公式计算出钝化 RDX 作用 45#钢时冲击波速度和冲击波压力衰减情况。通过比较理论计算的结果和实验结果可以看出两种结果吻合得比较好，从而验证了实验和理论研究的正确性。

4 炸药接触爆炸下金属板中冲击波衰减规律实验研究

为了研究炸药接触爆炸作用下金属介质中冲击波的衰减规律,进行了动态爆炸实验。本章详述了实验原理,给出了实验装置的安装情况以及测试系统的组成和各部分参数,列出了详细的实验数据、数据处理结果和结论。

4.1 金属板中冲击波衰减规律的概述

当金属板受到爆炸、冲击或高能粒子束等动载荷的作用下,金属板中均可形成一定强度的冲击波,这一冲击波得强度随传播距离的衰减规律一直是人们所关心的问题。本文研究的45#钢以及钢铝复合板,作为最常用和最具使用价值的材料类型,研究其在接触爆炸载荷下冲击波的衰减规律,对抗爆、抗冲击防护结构的设计、冲击波强度的控制(如炸药冲击起爆研究中金属板厚度的调整)和进一步认识在接触爆炸载荷下金属材料中冲击波的衰减规律及其机理等,都具有重要的参考、应用价值和理论指导意义。长期以来,围绕冲击波在密实材料中的传播与衰减问题,众学者分别从不同的角度对此进行过广泛的研究,提出了诸多衰减机理及相应的模型。因此,利用光纤探针测试技术,实验测量钝化RDX和含铝炸药RHTL分别与钢板、钢-铝板两种靶板接触爆炸条件下,靶板中不同位置的冲击波到达时间。根据材料的雨贡纽关系,得到了钝化RDX和RHTL作用下,钢板和钢铝复合板中冲击波衰减规律。

4.2 实验目的和原理

研究不同炸药(钝化RDX和含铝炸药RHTL)在与金属介质接触爆炸条件下,产生冲击波在金属介质中的衰减规律。通过测量得出在接触爆炸下金属介质中冲击波速度 D 随位移 x 的衰减规律即 $D-x$ 关系,进而利用已知的 $D-u$ (u 为粒子速度)关系(所用材料的雨贡纽关系已知)和质量、动量守恒关系推导出金属介质中的 $u-x$ 、 $p-x$ 、 $\rho-x$ 关系(p 为压力, ρ 为密度)。

4.3 实验研究

4.3.1 实验装置

4.3.1.1 炸药

实验中炸药的装配方法如图4.1所示。其中起爆雷管采用24-1-3D型高压雷管,传爆药柱为32 mm×11 mm的太安药柱,平面波透镜为Φ100 mm×37°的炸药透镜,主药柱为Φ100 mm×50 mm的钝化RDX炸药和RHTL炸药(含铝RDX)。所用主药柱的密度列于表4.1中。

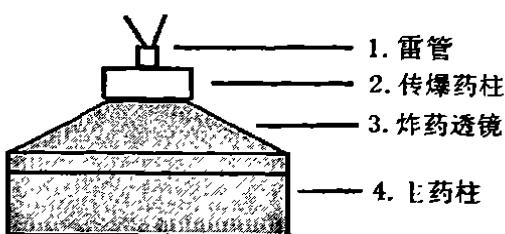


图 4.1 炸药装置示意图

表 4.1 实验中所用主炸药的密度

炸药编号	RDX-01	RDX-02	RDX-03	RHTL-01	RHTL-02
密度 (g/cm ³)	1.777	1.778	1.778	1.844	1.845

4.3.1.2 样品

金属样品总厚度为 10 mm。样品加工成台阶状，每台阶高度 2 mm，每个台阶上按 120° 均布 3 根光纤探针。金属板和炸药的接触面上安装 6 根光纤探针。样品形状如图 4.2。以此测出介质中不同位置处冲击波的速度，从而得出 D-x 曲线。样品材料选用 45# 钢和 LY12 铝，这两种材料的 $D-u$ 关系已知，即两种材料的雨贡纽参数已知，列于表 4.2 中。

表 4.2 LY12 铝和 45 钢的冲击波压缩参数^[57-58]

材料名称	ρ_0 (10^3 kg/m^3)	c_0 (km/s)	λ
45# 钢 (低碳钢)	7.850	3.574	1.920
LY-12 铝	2.785	5.328	1.338

图 4.3 给出了探针的安装位置及编号。实验中所用样品的编号及各台阶实测高度列于表 4.3 中(其中 G I -1, G I -3 都是钢板在钝化 RDX 下作用，重复实验；G I -2 是钢板在 RHTL 炸药下作用；G II -1, L II -1 是钢铝复合板在钝化 RDX 下作用；G II -2, L II -2 是钢铝复合板在 RHTL 炸药下作用)。

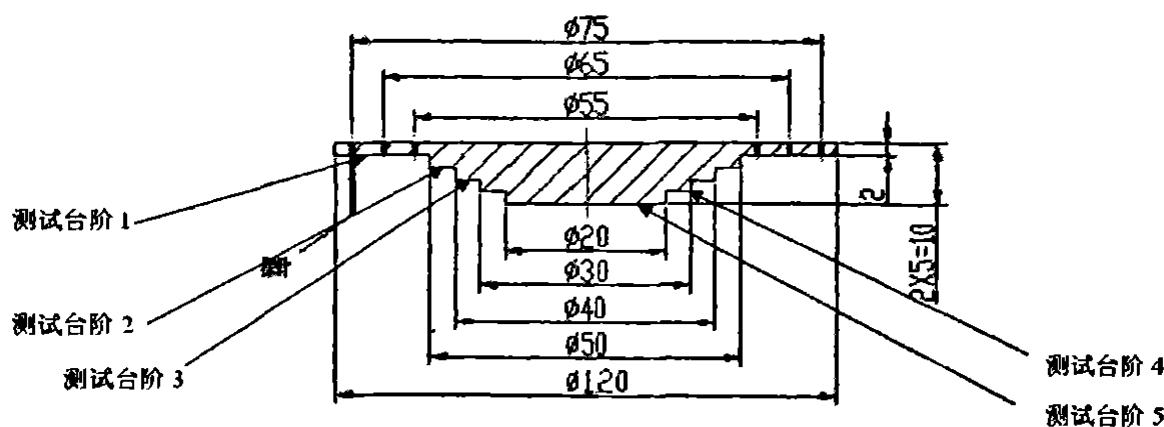


图 4.2 样品结构图

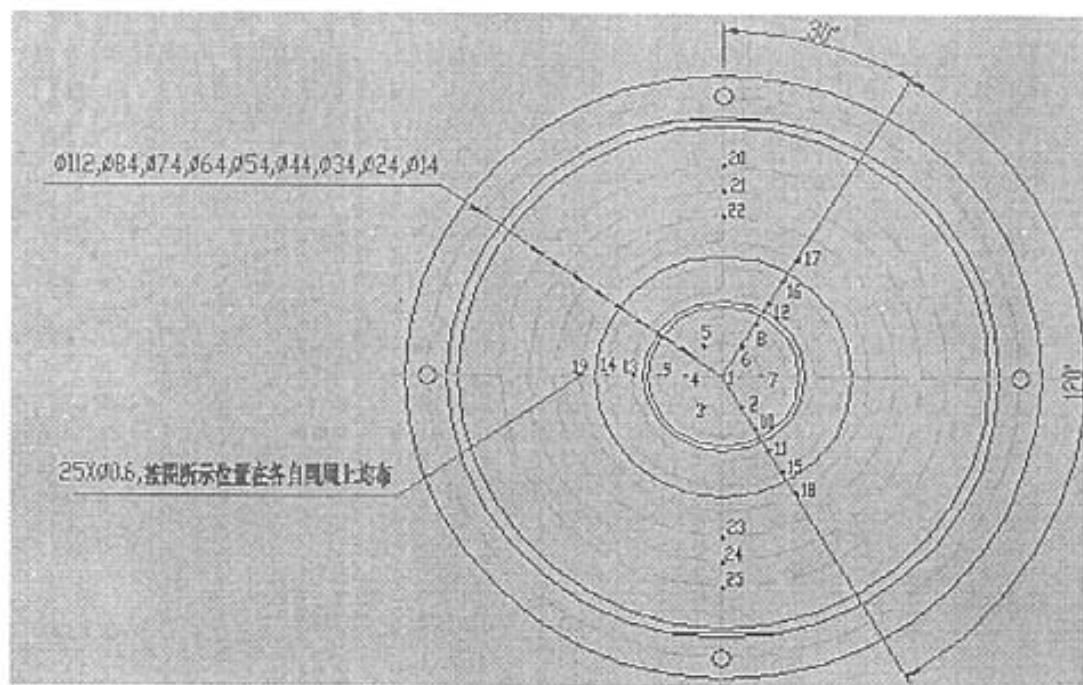


图 4.3 光纤探针安装位置及编号

注: 1~7 号探针安装在 5 台阶; 8~10 号探针安装在 4 台阶; 11~13 号探针安装在 3 台阶;
14~16 号探针安装在 2 台阶; 17~19 号探针安装在 1 台阶; 20~25 号探针安装在炸药面

表 4.3 样品台阶高度实测值 单位:mm

样品材料	样品编号	测试台阶	数据 1	数据 2	数据 3	数据 4	数据 5	平均值	台阶高度
45#钢	G I -1	1	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.080	2.080
		2	4.05	4.06	4.05	4.06	4.06	4.056	1.976
		3	6.02	6.01	6.02	6.02	6.01	6.016	1.960
		4	8.03	8.04	8.03	8.05	8.05	8.040	2.024
		5	10.06	10.07	10.06	10.06	10.06	10.000	2.022
LY12	G I -2	1	2.10	2.09	2.10	2.09	2.09	2.092	2.092
		2	3.98	3.98	3.99	4.00	4.00	3.990	1.898
		3	5.94	5.94	5.98	5.96	5.96	5.956	1.966
		4	7.99	7.98	7.97	8.00	7.96	7.980	1.924
		5	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.000	2.020
LY12	G I -3	1	2.06	2.06	2.06	2.07	2.07	2.064	2.064
		2	3.93	3.92	3.92	3.93	3.94	3.930	1.866
		3	5.94	5.93	5.93	5.93	5.94	5.934	2.004
		4	7.95	7.96	7.96	7.96	7.95	7.956	2.022
		5	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.010	2.054
LY12	G II -1	1	2.06	2.07	2.07	2.06	2.06	2.066	2.066
		2	4.04	4.03	4.04	4.02	4.02	4.030	1.964
	G II -2	1	2.04	2.03	2.03	2.04	2.04	2.036	2.036
		2	4.06	4.07	4.06	4.07	4.06	4.064	2.028
	L II -1	1	1.94	1.94	1.96	1.96	1.95	1.950	1.950
		2	3.94	3.93	3.94	3.94	3.96	3.942	1.992
		3	5.92	5.91	5.92	5.93	5.93	5.922	1.980
LY12	L II -2	1	1.96	1.93	1.94	1.96	1.97	1.952	1.952
		2	3.93	3.94	3.94	3.92	3.92	3.930	1.978
	-2	3	5.94	5.93	5.93	5.93	5.92	5.930	2.000

4.3.2 实验测试系统

实验采用光纤探针作为测量冲击波到达样品各台阶时间的传感器，整个测试系统布局如图 4.4 所示。

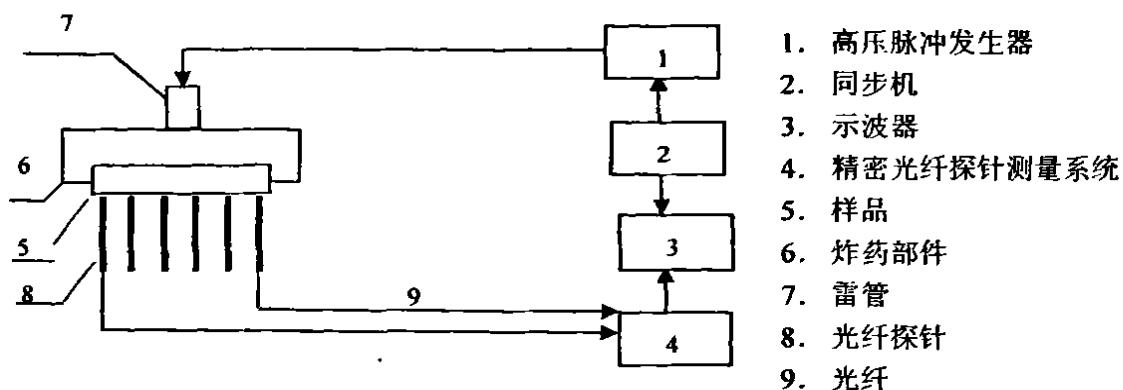


图 4.4 测试系统布局图

爆轰装置由 4.3.1 节介绍的雷管和炸药组成；起爆系统由高压脉冲发生器和同步机组成；测试系统由光纤探针、传输光纤、精密光纤探针测量系统和数字示波器组成。同步机的触发时刻为实验的零时。其中，精密光纤探针测量系统的响应时间小于 1ns，光纤测试通道之间的同步极差小于 2ns；数字示波器的模拟带宽为 500 MHz，采样率 1.25 GSa/s；同步机各通道同步差小于 1 ns。图 4.5、图 4.6 分别给出了光纤探针在样品上的安装照片和实验爆轰装置照片。

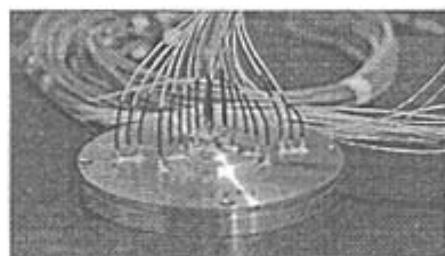


图 4.5 装好光纤探针后的样品照片



图 4.6 爆轰装置照片

4.4 实验结果

4.4.1 冲击波到达时间测量结果

共进行了 5 发动态实验, 测量了钝化 RDX 和 RHTL(RDX/Al)炸药与 45#钢和上钢下铝样品接触爆炸时, 冲击波到达 45#钢、钢铝复合板各台阶的时间。通过布置在靶板不同台阶上的光纤探针得到了不同位置的冲击波达到的时间, 典型的原始信号波形见图 4.7。

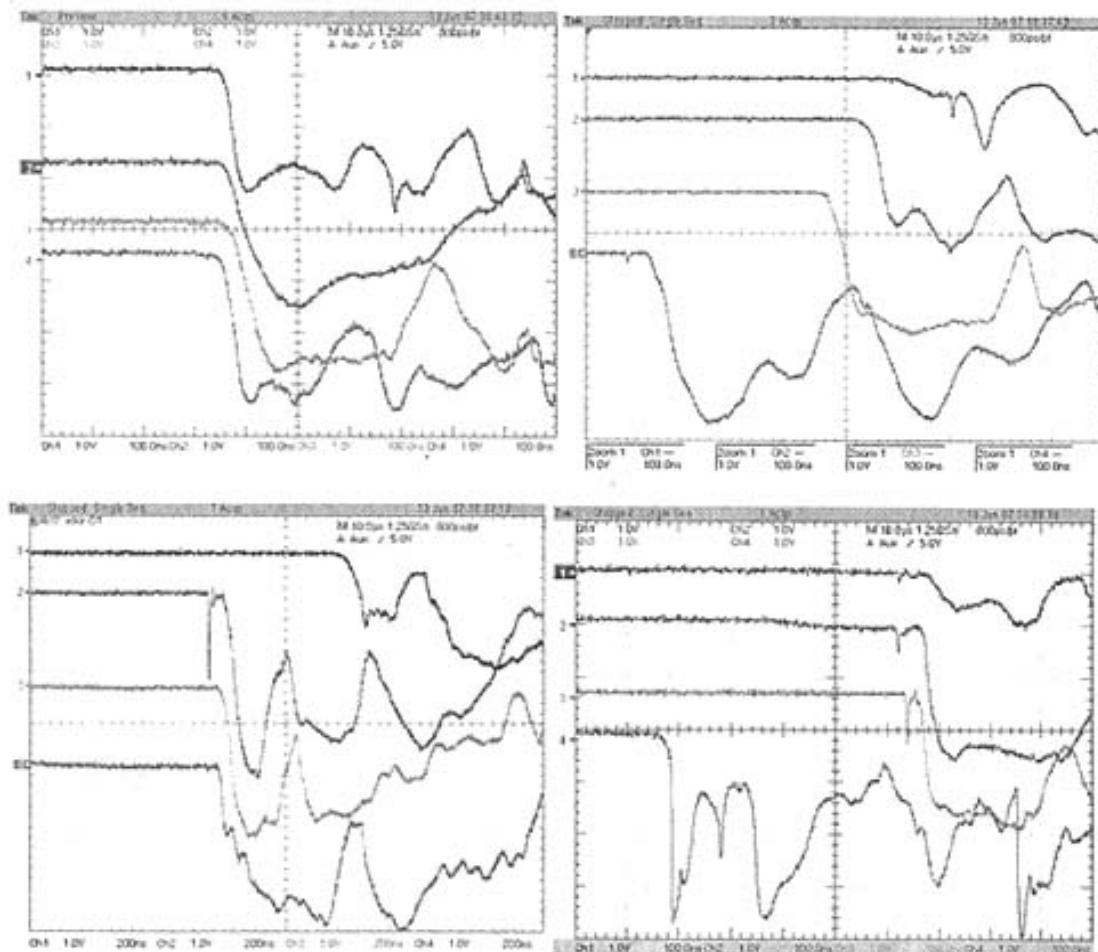


图 4.7 光纤探针所测得典型波形 (钝化 RDX+钢板)

炸药和靶板接触面对应的光纤作为记时起点, 图 4.7 中每个信号的前沿起跳点就是冲击波达到光纤探针的时刻, 它们之间的时间差除相应的台阶厚度可以获得冲击波速度。其中钝化 RDX 作用于钢板的实验为重复实验, 从实验的结果分析得到的结果重复性较好, 为了使论文的结构更加清楚, 比较更加明白, 我们只取其中一组数据作为分析, 实验中的各组冲击波在不同靶板中的达到时间如表 4.4 所列。

表 4.4 冲击波在靶板中不同位置的到达时间

炸药	靶板材料	探针位置/时间	接触面	台阶 1	台阶 2	台阶 3	台阶 4	台阶 5
钝化 RDX	钢板	x / mm	0	2.080	4.056	6.016	8.04	10.062
		$t / \mu\text{s}$	19.930	20.324	20.701	21.075	21.462	21.849
含铝炸药 RHTL	钢-铝	x / mm	0	2.064	4.030	5.980	7.972	9.952
		$t / \mu\text{s}$	20.004	20.396	20.780	21.061	21.378	21.709
含铝炸药 RHTL	钢板	x / mm	0	2.094	3.990	5.956	7.980	10.000
		$t / \mu\text{s}$	20.590	20.996	21.377	21.774	22.185	22.596
	钢-铝	x / mm	0	2.036	4.064	6.016	7.994	9.994
		$t / \mu\text{s}$	20.640	21.037	21.448	21.722	22.025	22.343

4.4.2 金属板中冲击波速度的衰减特性

首先对钝化 RDX 和含铝炸药 RHTL 爆炸加载作用下, 单层钢板中的冲击波速度的衰减特性进行了实验研究。实验条件如表 4.5 所示。

表 4.5 单层靶板的实验条件

组次	炸药	靶板材料	厚度 (mm)
1	钝化 RDX	45#钢 (G)	10
3	RHTL	45#钢 (G)	10

图 4.8 是实验得到的两种炸药作用下 45#钢单层靶板中冲击波速度随距离的衰减变化。具体的实验数据可见本章的表 4.7。

从图中可以看出, 炸药直接爆炸加载下, 钢板中的冲击波速度的衰减近似呈指数规律。拟合得到的冲击波速度 D (km/s) 随距离 x (mm) 的衰减公式如下:

钝化 RDX 作用下 45#钢中冲击波的衰减拟合公式:

$$D = 5.226 + 0.082e^{-0.428x} \quad (1 \leq x \leq 9)$$

RHTL 作用下 45#钢中冲击波的衰减拟合公式:

$$D = 6.429 + 1.412e^{-0.144x} \quad (1 \leq x \leq 9)$$

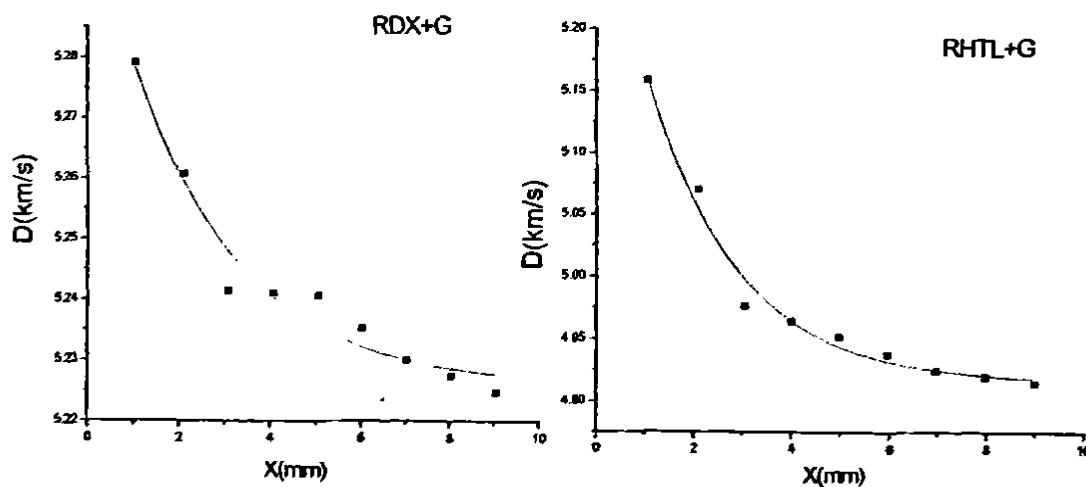


图 4.8 钝化 RDX (或 RHTL) 作用下钢板中速度-位置变化分布

为了区别不同条件下介质中冲击波速度的衰减差异, 将图 4.8 中的两条曲线合并 在图 4.9 上进行比较。

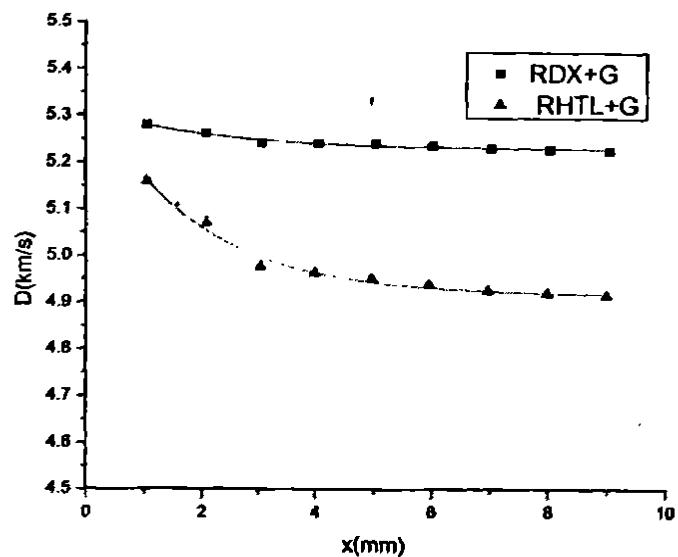


图 4.9 单层靶板中冲击波速度的衰减特性

由图 4.9 可以看出不同炸药作用下, 介质中的冲击波初始速度和冲击波衰减特性也有所区别, 含铝炸药 RHTL 爆炸加载下, 介质中的冲击波初始速度相对较小, 而衰减相对较快。这是由于铝粉的加入, 引起了含铝炸药 RHTL 的爆速及爆压的降低, 使得含铝炸药的冲击波阻抗小于钝化 RDX, 可见炸药的爆轰性能决定在介质初始界面上的冲击波参数。

为了和单层钢板实验进行对比，在双层靶板实验中仍取靶板的厚度为10mm。不同炸药对双层靶板爆炸作用的实验条件如表4.6所示。

表4.6 双层靶板的实验条件

组次	炸药	第一层		第二层	
		靶板材料	厚度 (mm)	靶板材料	厚度 (mm)
1	钝化 RDX	45#钢 (G)	4	LY12 铝 (L)	6
2	RHTL	45#钢 (G)	4	LY12 铝 (L)	6

图4.10为双层靶板中冲击波速度随传播距离的衰减关系，其中左图的实验条件是以钝化RDX作为爆炸加载，右图的实验条件是以RHTL作为爆炸加载。

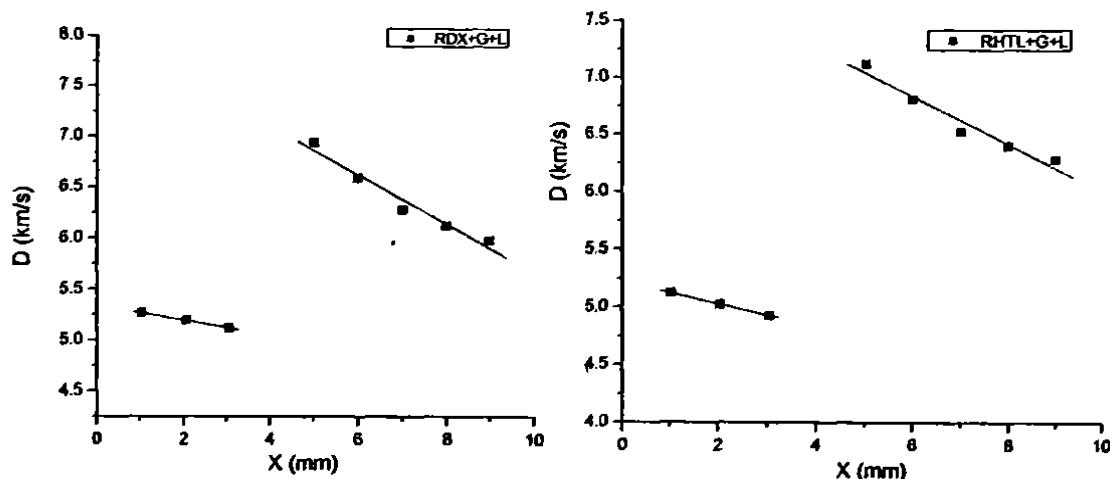


图4.10 钝化RDX（或RHTL）作用下双层靶板中冲击波速度-位置变化分布

由于45#钢和LY12铝两种材料的冲击波阻抗 ρD 不同，因此冲击波经过两种材料的分界面时冲击波参数会发生突跃。从图4.10中可以看出冲击波在内外层靶板中速度呈分段分布。由于冲击波通过分界面时速度不能看作匀速，因此不能根据冲击波通过分界面前后台阶的时间差求得分界面上的速度，因此在图4.10中分界面处（约在靶板的4mm左右）没有显示冲击波速度值，但是在作图时可以通过前后介质中冲击波衰减曲线进行外推估算界面处的冲击波参数。

对图4.10中内外层靶板中冲击波速度的衰减曲线进行外推，得到钝化RDX和RHTL作用下双层靶板中冲击波速度随传播距离的衰减特性的对比关系，如图4.11所示。

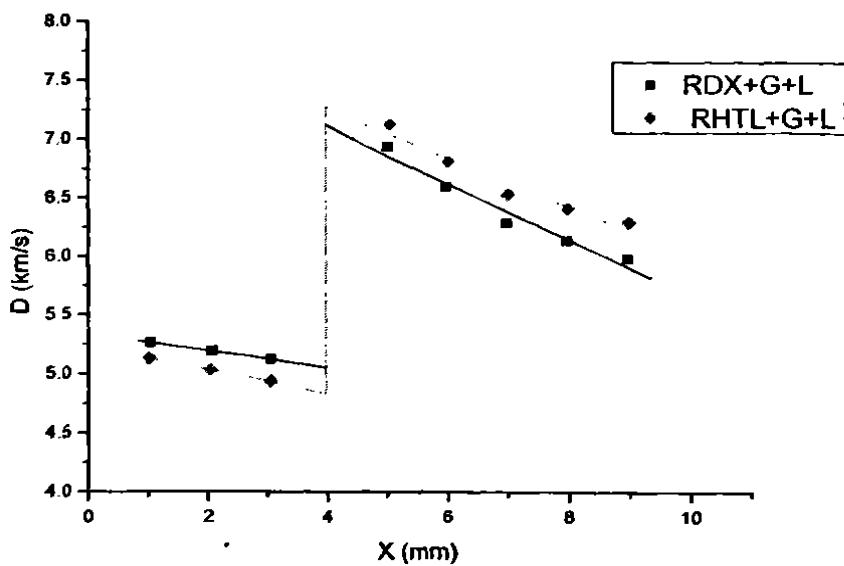


图 4.11 钝化 RDX 和 RHTL 作用下双层靶板中冲击波速度-位置变化分布

从图 4.11 中可以看出, 不同炸药与同一结构的双层靶板爆炸作用, 在第一层靶板中, 钝化 RDX 作用下靶板中的冲击波初始速度要比 RHTL 作用下大, 衰减也相对较慢; 经过分界面在第二层靶板中, RHTL 作用下的冲击波速度反而要比钝化 RDX 作用下衰减缓慢。

无论是在钝化 RDX 还是在含铝炸药 RHTL 爆炸作用下, 冲击波从钢板中透射入铝板中冲击波速度是突跃增加的。这是由材料的冲击波阻抗决定的, 冲击波从高阻抗材料进入低阻抗材料, 速度增加; 反之从低阻抗材料进入高阻抗材料, 速度降低。在分界面处冲击波压力和质点速度的变化可用图 4.12 来解释。

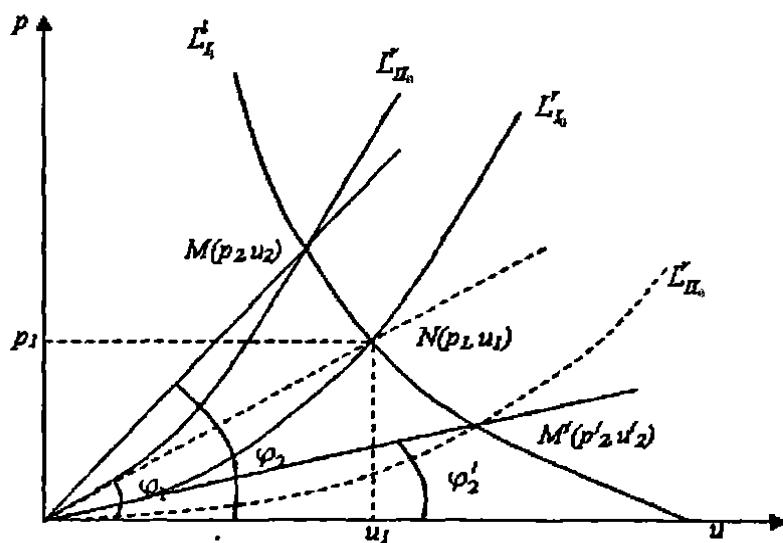


图 4.12 介质分界面处冲击波 $p-u$ 曲线

在 $p-u$ 图上如果用曲线 L'_1 表示入射波的雨贡纽曲线, 点 $N(p_t, u_t)$ 为入射波阵面的动力学参量。金属材料的初始密度比较大, 入射波传过后, 由于受到压缩, 结构变得更加密实, 因此反射冲击波传播时所引起的熵值增加很小, 可以忽略不计。介质 I 中反射冲击波的雨贡纽曲线与入射冲击波的雨贡纽曲线可近似视为镜像对称。入射冲击波在分界面处发生反射之后, 由于分界面两侧的压力和质点速度是连续的, 因此分界面的状态应该在 L'_1 和 L''_1 相交处。如果介质的 I 的波阻抗大于介质 II 的波阻抗(如冲击波从钢到铝), 则相交点在 N 点的下方, 即通过分界面后质点速度是上升的, 压力是下降的, 由于冲击波速度和质点速度呈线性关系, 所以冲击波速度也是上升的; 反之, 如果介质的 I 的波阻抗小于介质 II 的波阻抗, 则相交点在 N 点的上方, 即通过分界面后质点速度是下降的, 压力是上升的由于冲击波速度和质点速度呈线性关系, 所以冲击波速度也是下降的。

4.4.3 金属板中冲击波压力的衰减特性

对于绝大多数密实介质, 冲击波速度 D 与质点速度成线性关系^[52], 即

$$D = c_0 + \lambda u \quad (4-1)$$

本实验中所用的金属材料是 45#钢和 LY-12 铝, 这两种材料的雨贡纽参数是已知的, 见表 4.2。

冲击波在介质中传播后, 介质的状态参量满足质量守恒和动量守恒, 即

$$\rho_0(D-u_0) = \rho(D-u) \quad (4-2)$$

$$p - p_0 = \rho_0(D-u_0)(u-u_0) \quad (4-3)$$

式中:

ρ_0 —波前介质的密度

u_0 、 p_0 —波前介质的质点速度和压力

D —冲击波速度

p 、 ρ —波后介质的速度和密度

联立 (4-1) — (4-3) 式便可求出波后 u 、 p 、 ρ 等参量随距离的分布。具体数据可见本章的表 4.8-4.10。在冲击波的各个参量中, 人们对冲击波压力最为感兴趣, 因为压力直接反映爆炸载荷对目标的破坏程度和材料的抗爆、隔爆的能力。单层靶板中冲击波压力随传播距离的分布如图 4.12 所示。

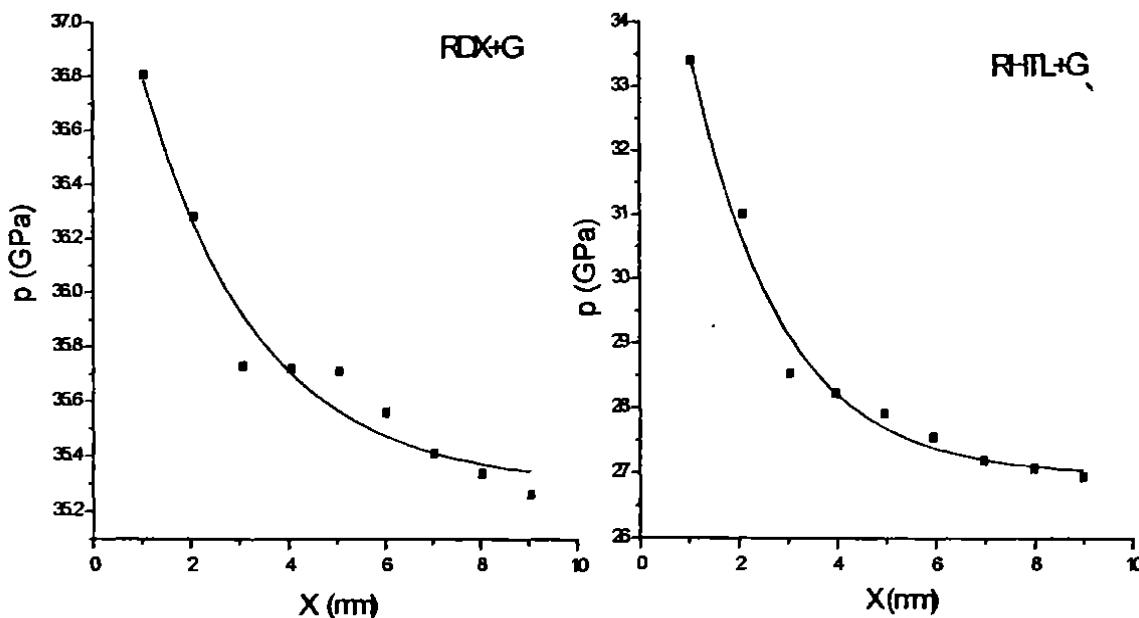


图 4.13 钝化 RDX (或 RHTL) 作用下钢板中冲击波压力-位置变化分布

由于冲击波压力在材料中基本呈指数规律的衰减^[55,59]，因此在图 4.13 中采用指数型函数进行了拟合，得到的冲击波压力 p (GPa) 随距离 x (mm) 的衰减公式如下：

钝化 RDX 作用下 45# 钢中冲击波的衰减拟合公式：

$$p = 35.30 + 2.32e^{-0.431x} \quad (1 \leq x \leq 9) \quad (4-4)$$

RHTL 作用下 45# 钢中冲击波的衰减拟合公式：

$$p = 26.97 + 11.68e^{-0.562x} \quad (1 \leq x \leq 9) \quad (4-5)$$

同样，为了便于比较不同条件下介质中冲击波压力的衰减特性，将图 4.13 中的两条曲线合并在图 4.14 上进行比较。

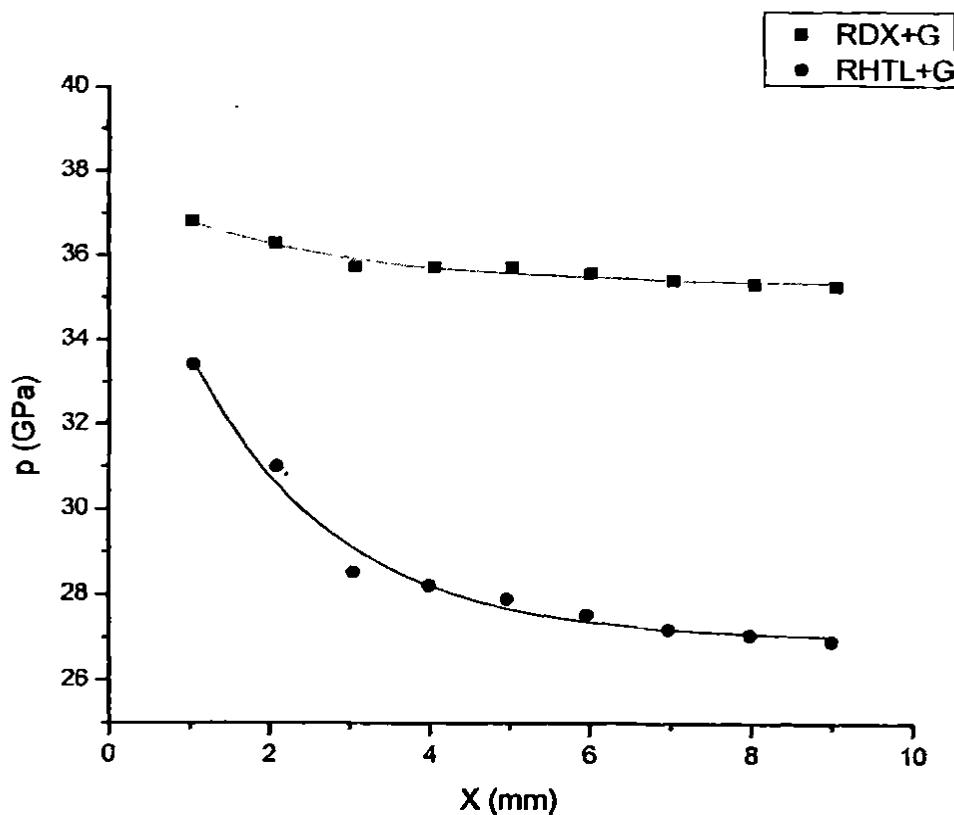


图 4.14 不同炸药作用 45#钢板中冲击波压力-位置变化分布

从图 4.14 可以看出, 不同炸药作用于 45 号钢的靶板, 钝化 RDX 作用下靶板中的冲击波压力总要大于含铝炸药 RHTL, 这是由于钝化 RDX 的爆速、爆压要大于含铝炸药 RHTL。

从图 4.14 还可以得到, 在本实验的靶板厚度的范围内, 作用于相同目标靶板, RHTL 作用下靶板中冲击波压力的衰减相对较快。实验表明在无约束的直接爆炸作用下, 含铝炸药 RHTL 对单层金属目标靶板的作用效果不如钝化 RDX。

钝化 RDX 和含铝炸药 RHTL 对双层靶板作用时, 冲击波在金属板中随传播距离的衰减关系见图 4.15。

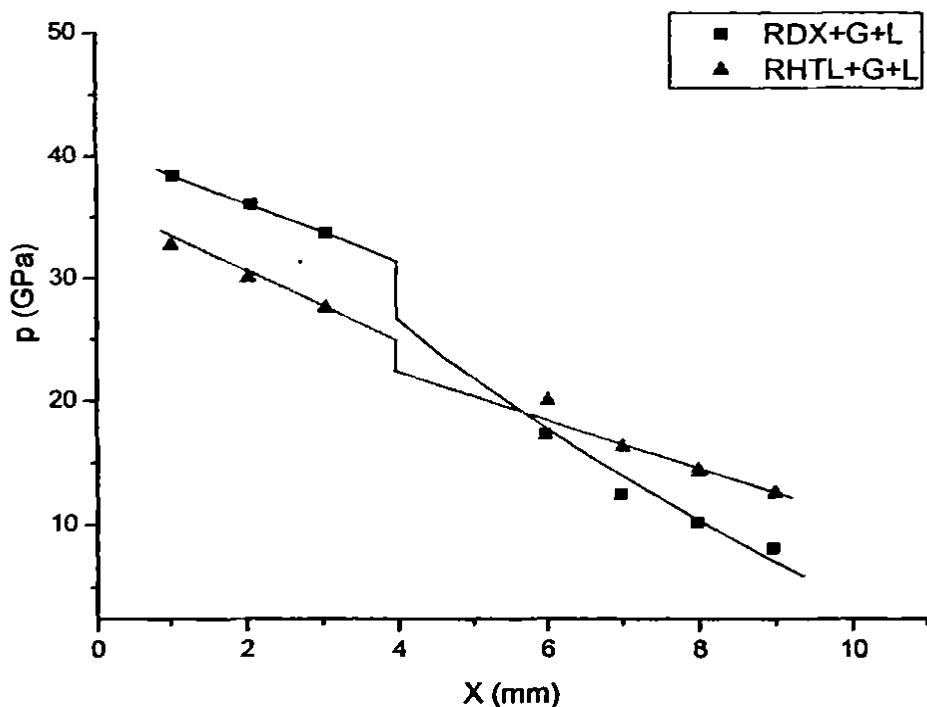


图 4.15 双层靶板中冲击波压力衰减特性

与冲击波速度在双层靶板中的分布一样,由于材料的冲击波阻抗的不同,冲击波压力在分界面上也存在着突越。从图 4.15 可以看出,无论是在钝化 RDX 还是在 RHTL 的爆炸作用下,冲击波从钢板传播到铝板时,经过分界面压力是突然下降的;然后随着距离的变化不断衰减。冲击波从钢板传播到铝板时,经过分界面压力是突然下降的原因可以参考图 4.12 的解释。

在双层靶板实验中,炸药与靶板接触面上冲击波压力初始压力仍然是钝化 RDX 作用在钢板时最大, RHTL 作用在铝板时最小。冲击波经过分界面后, RHTL 作用下冲击波压力的衰减要比在钝化 RDX 作用下缓慢。

实验中双层靶板的厚度均取的是第一层为 4mm, 第二层 6mm。在这种情况下排列次序是钢-铝, 虽然与炸药接触面上的初始压力相对较大, 但是由于冲击波经过分界面后压力衰减较快。由此可见双层靶板中冲击波压力的衰减特性是由炸药的性质、靶板材料的冲击压缩性、靶板排列次序等因素综合作用决定的。

4.6 本章小节

本章利用光纤探针测试技术,测试了典型的理想炸药钝化 RDX 和有非理想爆轰特征的含铝炸药 RHTL, 分别与钢板、钢-铝板接触爆炸条件下,靶板中不同位置的冲击波达到时间,得到冲击波波速,并根据材料雨贡纽关系与质量守恒和动量守恒换算得到波后质点速度、压力和密度。实验结果表明:

(1) 钝化 RDX 与不同材料、结构的目标板作用下, 靶板内的初始冲击波速度、压力、密度、质点速度等参量要高于含铝炸药 RHTL 所作用下目标板内相应的参量。

(2) 含铝炸药 RHTL 爆炸加载下, 介质中的冲击波初始速度和初始压力相对较小, 而衰减相对较快。这是由于铝粉的加入, 引起了含铝炸药 RHTL 的爆速及爆压的降低, 使得含铝炸药的冲击波阻抗小于钝化 RDX, 可见炸药的爆轰性能决定在介质初始界面上的冲击波参数。

(3) 实验证明了冲击波经过双层靶板的界面冲击波参量发生突跃, 从钢进入铝中冲击波速度和质点速度增加, 压力减小。

(4) 在本实验的靶板厚度的范围内, 作用于相同目标靶板, RHTL 作用下靶板中冲击波压力的衰减相对较快。实验表明在无约束的直接爆炸作用下, 含铝炸药 RHTL 对单层金属目标靶板的作用效果不如钝化 RDX 好, 但对钢铝复合板, RHTL 作用下的冲击波压力、速度的衰减都比钝化 RDX 要缓慢, 所以其作用效果好; 但对钢铝复合板, RHTL 作用下的冲击波压力、速度的衰减都比钝化 RDX 要缓慢, 所以其作用效果好。

表 4.7 钝化 RDX 和 RHTL 作用下靶板中不同位置的冲击波速度

炸药	靶板	参数	位置 (mm) / 冲击波速度 (km/s)									
			45号	x	1.040	2.080	3.068	4.056	5.036	6.016	7.028	8.040
RDX	钝化钢	D	5.279	5.261	5.241	5.241	5.241	5.235	5.230	5.227	5.225	
		x	1.032	2.064	3.047	—	5.005	5.980	6.976	7.972	8.962	
	钢-铝	D	5.265	5.193	5.120	—	6.940	6.592	6.284	6.130	5.982	
		x	1.018	2.036	3.050	—	5.040	6.016	7.005	7.994	8.994	
RHTL	含铝炸药	D	5.128	5.030	4.934	—	7.124	6.811	6.528	6.406	6.289	
		x	1.047	2.094	3.042	3.990	4.973	5.956	6.968	7.980	8.990	
	钢-铝	D	5.158	5.070	4.976	4.964	4.952	4.938	4.925	4.920	4.915	
		x	1.018	2.036	3.050	—	5.040	6.016	7.005	7.994	8.994	

表 4.8 钝化 RDX 和 RHTL 作用下靶板中不同位置的质点速度

炸药	靶板	参数	位置 (mm) / 质点速度 (km/s)									
			45号	x	1.032	2.064	2.996	3.928	4.931	5.934	6.945	7.956
RDX	钝化钢	u	0.888	0.878	0.868	0.868	0.868	0.865	0.862	0.861	0.860	
		x	1.032	2.064	3.047	—	5.005	5.980	6.976	7.972	8.962	
	钢-铝	u	0.927	0.882	0.835	—	1.204	0.945	0.714	0.599	0.489	
		x	1.018	2.036	3.050	—	5.040	6.016	7.005	7.994	8.994	
RHTL	含铝炸药	u	0.825	0.779	0.730	0.724	0.718	0.711	0.703	0.701	0.698	
		x	1.047	2.094	3.042	3.990	4.973	5.956	6.968	7.980	8.990	
	钢-铝	u	0.810	0.758	0.708	—	1.342	1.108	0.897	0.806	0.718	
		x	1.018	2.036	3.050	—	5.040	6.016	7.005	7.994	8.994	

表 4.9 钝化 RDX 和 RHTL 作用下靶板中不同位置的冲击波压力

炸药	靶板	参数	位置 (mm) / 冲击波压力 (GPa)								
			x	1.032	2.064	2.996	3.928	4.931	5.934	6.945	7.956
钝化 RDX	45 号钢	P	36.805	36.279	35.731	35.721	35.710	35.557	35.410	35.337	35.264
	钢 - 铝	x	1.032	2.064	3.047	—	5.005	5.980	6.976	7.972	8.962
	钢 - 铝	P	38.332	35.950	33.571	—	23.277	17.343	12.503	10.228	8.141
	含铝炸药	x	1.047	2.094	3.042	3.990	4.973	5.956	6.968	7.980	8.990
RHTL	45 号钢	P	33.394	31.007	28.533	28.211	27.903	27.541	27.193	27.068	26.944
	钢 - 铝	x	1.018	2.036	3.050	—	5.040	6.016	7.005	7.994	8.994
	钢 - 铝	P	32.594	29.935	27.443	—	26.633	21.026	16.306	14.371	12.584

表 4.10 钝化 RDX 和 RHTL 作用下靶板中不同位置的密度

炸药	靶板	参数	位置 (mm) / 密度 (10^3 kg/m^3)								
			x	1.032	2.064	2.996	3.928	4.931	5.934	6.945	7.956
钝化 RDX	45 号钢	ρ	9.438	9.424	9.409	9.409	9.408	9.404	9.400	9.398	9.396
	钢 - 铝	x	1.032	2.064	3.047	—	5.005	5.980	6.976	7.972	8.962
	钢 - 铝	ρ	9.528	9.456	9.380	—	3.370	3.251	3.142	3.087	3.033
	含铝炸药	x	1.047	2.094	3.042	3.990	4.973	5.956	6.968	7.980	8.990
RHTL	45 号钢	ρ	9.344	9.275	9.200	9.190	9.181	9.170	9.158	9.154	9.150
	钢 - 铝	x	1.018	2.036	3.050	—	5.040	6.016	7.005	7.994	8.994
	钢 - 铝	ρ	9.322	9.243	9.166	—	3.432	3.326	3.229	3.186	3.144

5 结论

5.1 本文的主要内容与结论

本文从理论和实验两方面研究了接触爆炸下金属板中冲击波的衰减规律,得出了典型的理想炸药钝化 RDX 和有非理想爆轰特征的含铝炸药 RHTL 作用下金属板中冲击波衰减规律的不同效果。主要内容和结论如下:

(1) 本文进行了接触爆炸下金属介质中冲击波的初始参量的计算,在计算冲击波初始参数的过程中,首先要判定接触爆炸时产物中反射波的判定,由于本文主要研究的介质是 45#钢,因此在爆炸产物中反射冲击波,其次研究了冲击波垂直入射时介质中冲击波的初始参数的计算公式以及用作图法计算冲击波的初始参数。从而计算了钝化 RDX 炸药和含铝 RHTL 炸药接触爆炸时 45#钢中冲击波初始参量的结果,结合实验的参数得出冲击波的初始参量: 钝化 RDX 在 45#钢接触爆炸时的初始参数 $p_{mx} = 51.38 \text{ GPa}$, $u_{mx} = 1137 \text{ m/s}$; 含铝炸药 RHTL 在 45#钢接触爆炸时的初始参数 $p_{mx} = 35.67 \text{ GPa}$, $u_{mx} = 865.4 \text{ m/s}$ 。

(2) 理论研究了凝聚介质中冲击波衰减的规律,从最基本的凝聚介质的冲击波关系式,即实验冲击波关系式和实用状态方程时的冲击波关系式,从等熵方程的概念可以看出当凝聚介质中的冲击波简化为比较简单的形式,即一维等熵变化时,可以求出冲击波相关参数的一维解析解,在理论求解的过程中,假设冲击波的衰减是一维变化的,从而通过研究得出了冲击波相关参数的衰减公式,通过这些公式的计算以及和实验结果的比较可以看出两种结果吻合的比较好,从而验证了实验和理论研究的正确性。

(3) 利用光纤探针测试技术,实验研究钝化 RDX 和含铝炸药 RHTL 分别与钢板、钢-铝板两种靶板接触爆炸条件下靶板中的冲击波的衰减规律,得出的结论为:

①钝化 RDX 与不同材料、结构的目标板作用下,靶板内的初始冲击波速度、压力、密度、质点速度等参量要高于含铝炸药 RHTL 所作用下目标板内相应的参量。

②含铝炸药 RHTL 爆炸加载下,介质中的冲击波初始速度和初始压力相对较小,而衰减相对较快。这是由于铝粉的加入,引起了含铝炸药 RHTL 的爆速及爆压的降低,使得含铝炸药的冲击波波阻抗小于钝化 RDX,可见炸药的爆轰性能决定在介质初始界面上的冲击波参数。

③实验验证了冲击波经过双层靶板的界面冲击波参量发生突跃,从钢进入铝中冲击波速度和质点速度增加,压力减小。

④在本实验的靶板厚度的范围内,作用于相同目标靶板, RHTL 作用下靶板中冲击波压力的衰减相对较快。实验表明在无约束的直接爆炸作用下,含铝炸药 RHTL 对单层金属目标靶板的作用效果不如钝化 RDX 好。

5.2 本文的主要特色

本文在国家某重大基础研究项目的资助下, 以实验、理论相结合的手段, 有针对性的研究了理想炸药钝化 RDX 和非理想含铝炸药 RHTL 分别对 45 号钢单层板和钢-铝双层板的作用, 主要特色如下:

(1) 在实验中, 为了准确地测量冲击波的到达时间, 样板设计成台阶状, 这样可以减少侧向稀疏的影响, 并且设计相对简单精确度高, 实验的测量更加准确。

(2) 应用一整套先进的测试系统, 测试系统由光纤探针、传输光纤、精密光纤探针测量系统和数字示波器组成。其中, 精密光纤探针测量系统的响应时间小于 1ns, 光纤测试通道之间的同步极差小于 2ns; 数字示波器的模拟带宽为 500 MHz, 采样率 1.25 GSa/s; 同步机各通道同步差小于 1 ns。

(3) 利用光纤探针技术对含铝炸药在单层、复合双层金属板中的冲击波衰减规律进行了实验研究。

5.3 问题与展望

凝聚介质中冲击波的衰减规律是一个涉及面很广, 研究内容相当复杂的问题, 要想全面和精确的描述其中的物理现象和本质规律, 需要有先进的测试技术、进行大量的实验及理论研究, 因此本文也不可能仅用一篇论文就能阐述清楚, 因而本文只是针对理想炸药和非理想含铝炸药金属靶板接触爆炸作用, 这个典型的问题进行研究探讨。虽然通过本文的研究取得了一些有意义的结果。然而, 仍然有一些问题有待于进一步深入研究:

(1) 为了获得更加准确的普遍的冲击波衰减规律, 还需要进行大量的实验研究。

(2) 本文在理论研究方面研究凝聚介质中冲击波衰减规律时, 是在一维等熵流假设下只考虑波后稀疏波影响的情况, 还需要进一步研究多方面因素的影响。

(3) 在实验方面还需要进一步研究其他金属以及多层板中冲击波的衰减规律, 从而获得更加准确的冲击波衰减规律。

致 谢

在本论文完成之际，我谨将此论文献给关心和帮助过我的所有师长、同学、朋友和家人，并向他们表示衷心感谢。

首先要感谢我的两位导师彭金华教授和陈网桦副教授，本文是在两位导师的悉心指导和严格要求下完成的。多年来导师们的严谨的治学态度、渊博的理论与专业知识、忘我的工作热情和平易近人的生活作风使我受益匪浅。从他们身上学到许多做人处事的信条是我又一大收获。学生铭谢导师给予的精心培养、严格要求和热情关怀。

感谢中国工程物理研究院流体物理研究所的李泽仁研究员、彭其先副研究员、王荣波工程师在光纤测试实验中给与的指导和帮助。

感谢化工学院马红梅、洪敏华、王连云三位老师在学习和生活上给予帮助和关心。

感谢饶国宁师兄、陈利平师姐在学习上的指导和生活上的帮助。

感谢同一课题组钱俊、邓吉平、肖秋平等同学，我们大家在共同的学习、工作中结下的深厚情谊将永远铭记在心中。

参考文献

- 1 李维新. 一维不定常流与冲击波. 北京: 国防工业出版社. 2004
- 2 王海福, 冯顺山. 多孔材料中冲击波衰减特性的实验研究. 北京理工大学学报, 1997, 17 (1): 41-44
- 3 王永刚 胡时胜 王礼立. High-Velocity Impact Phenomena. 爆炸与冲击, 2003, 23 (6)
- 4 R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz , W. J. Carter and R. Kinslow. Shock compression of aluminum, copper, and tantalum. Academic Press, New York and London, 1970, Chap. VII: 312
- 5 A. C. Mitchell and W. J. Nellis. Lawrence Livermore National Laboratory, 1980
- 6 袁树云, 彭其先, 虞德水, 刘俊, 马冬莉. 多点双灵敏度VISAR测爆轰 驱动金属飞层自由面速度. 爆轰波与冲击波, 2005, (5): 122-124
- 7 Barker L M Hollenbach R E. Laser Interferometer for Measuring High Velocities of any Reflecting Surface. Appl Phys, 1972, 43 (11): 4669 - 4675
- 8 G. Eden and R. W. Wright. Fourth symposium on detonation, 1965: 573
- 9 Amery B T. Wide Range Velocity Interferometer. Proc. of the 6th symposium on detonation. 1976: 673-681
- 10 Hemsing W F. Velocity sensing Interferometer(VISAR) Modification. Rev. Sci. Instrum, 1979, 50(1): 73-78
- 11 Barker L M. Multi-Beam VISAR for Simultaneous Velocity vs. Time measurements, Shock Compression of Condensed Matter-1999. M. D. Furnish, 2000: 999-1002
- 12 Goranson B , Bancroft D , Burton B L. Dynamic Determination of the Compressibility of Metals. J Appl Phys, 1955, 26(12): 1472-1479
- 13 Duff R E , Houston E. Measurement of the Chapman-Jouguet Pressure and Reaction Zone Length in a Detonating High Explosive. J Chem Phys. 1955 ,23(7): 1268-1273
- 14 唐敬友, 伍绍珍, 王藩侯, 谷岩, 董庆东. 冲击波加热的氦气与氩气对电探针导通的影响. 高压物理学报, 2000, 14 (4) : 285-290
- 15 唐敬友, 岳鹏涛. 电探针保护气体的优选原则. 流体力学实验与测量, 2003, 17(1): 28-31
- 16 Zhi-Yue Liu, Shiro Kubota, Shirou Nagano, Shigeru Itoh. High-speed photographic study on overdriven detonation of high explosive. 24th International Congress on High-Speed, SPIE Vol. 4183, 2001
- 17 Ola Wall. Dynamic crack propagation in large steel specimens. Engineering

- Fracture Mechanics, 2002, (69) : 835 - 849
- 18 吴云峰 叶玉堂 谭显祥. 转镜式高速相机控制系统. 仪器仪表学报, 2004, 25 (1) : 134-137
- 19 谭显祥. 高速扫描相机时间测量不确定度分析. 光子学报, 2002; 31 (11) : 1387-1390
- 20 刘宁文, 桑永生, 肖正飞, 畅里华, 尚长水. 两台联动转镜式高速相机像漂移分析. 高压物理学报, 2006, 20 (1) : 80-82
- 21 Mitchell A. C, Nellis W. J. Shock compression of aluminum, copper and tantalum. Journal of Applied Physics, 1981, 52 (5): 3363-3374.
- 22 Sandival J. S, Idzorek G C, Ortega D. Fiber optic diagnostic for Z-experiments. IEEE , 2002, 785-787
- 23 王荣波, 何莉华, 田建华等. 两种光纤探针在冲击波作用下的时间响应. 高压物理学报, 2005, 19 (3): 284-288
- 24 Roeske F. A fast rise-time fiber optic pin. Eleventh International Symposium on Detonation. Arlington: Office of Naval Research, 1998: 422-427
- 25 Veeser L. R, Clark D. A, Holtkamp D. B, et al. Subcritical plutonium experiment at the Nevada test site. California: University of California, 1997: 94-101
- 26 Veeser L. R, Clark D. A, Holtkamp D. B, et al. Subcritical plutonium experiment at the Nevada test site. California: University of California, 1997: 94-101
- 27 M. van Thiel. Compendium of shock wave Data. UCRL-0108Rev. 1, Vols. 1-3, 1977.
- 28 H. Jones. W. M. Isbell. and C. J. Maiden. Measurement of the Very-High-Pressure Properties of Material using a Light-Gas Gun. J. Appl. Phys, 1966, (37) : 3493
- 29 G. R. Gather and A. C. Mitchell. Hugoniot measurement in Aluminum to 420GPa using the LLNL Two-Stage Light-Gas Gun. UCRL-92204, 1985
- 30 J. A. Morgan. The equation-of-state of platinum to 680Gpa. High Temperature-high Pressure, 1974, (6) : 195
- 31 N. C. Home. Equation-of-state measurements of low-density materials. Rev. Sci. Instrum, 1991, (8) : 62
- 32 王翔. 金属材料状态方程精确实验测量技术研究. 中国工程物理研究院学位论文, 2004
- 33 Seyed Hadi Ghaderi, Hassan Moslemi Naeini, Gholam Hossein Liaghat. Numerical

- analysis of plastic deformation of a circular sheetmetal subjected to transverse impact loading. International Journal of Impact Engineering, 2007, (34): 668 - 680
- 34 S. Chung Kim Yuen, G. N. Nurick. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part I: Subjected to uniform blast load. International Journal of Impact Engineering , 2005, (31): 55-83
- 35 周睿, 冯顺山, 吴成. 条形装药接触爆炸对金属靶板作用的断裂效应. 北京理工大学学报, 2001, 21 (4): 405-409
- 36 盖京波, 王善, 杨世全. 舰船板架在接触爆炸冲击载荷作用下的破坏. 舰船科学技术, 2005, 27 (5): 16-18
- 37 Stanislaw.etal. Measurement of shock wave velocity in plexiglass for detection of energy release in Aluminized nonideal explosives. energetic materials, 1999, 7(1):34-37
- 38 韩勇, 韩敦信, 卢校军等. 含铝炸药爆压及能量释放过程的研究. 含能材料, 2003, 11 (4): 191-193
- 39 朱兆祥, 李永池, 王肖钧. 爆炸作用下钢板层裂的数值分析. 应用数学和力学, 1981, 2 (4): 353-368
- 40 王礼立, 胡时胜, 王肖钧. 在弹塑性介质中传播的平面激波的衰减. 中国科学技术大学学报, 1983, 13 (1): 90-100
- 41 陈熙蓉, 王可, 刘德润等. 冲击波在不同材料隔板中的衰减特征. 兵工学报, 1991, (2): 75-80
- 42 王海福, 冯顺山. 密实介质中冲击波衰减特性的近似计算. 兵工学报, 1996, 17 (1): 79-81
- 43 张熙和, 云主惠编著. 爆炸化学. 北京: 国防工业出版社, 12, 1989
- 44 吴雄, J. Energetic Materials. 1985. 3(4), 263-278
- 45 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂编著. 军用混合炸药. 北京: 兵器工业出版社. 1995
- 46 Mader C L. FORTRAN BKW, LA-3704, 1967
- 47 Mader C L. LA-5864, 1975
- 48 吴雄, 林如山, 应用FORTRAN BKW程序计算与评价爆轰性能. 火炸药, 1978, (1)
- 49 Wu Xiong, Propellants Explosives Pyrotechnics 1985, (10):47-52
- 50 田中可己. 根据分子间势能模型研究爆轰特性. 第一报-第八报, 1982-1985.
- 51 陈网桦, 彭金华, 胡毅亭. 爆炸动力学讲义. 南京: 南京理工大学出版社, 2005
- 52 北京工学院八系. 爆炸及其作用. 北京: 国防工业出版社, 1979
- 53 R. G. . McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz and W. J. Carter. The equation

- of state of solid from shock wave studies, in high-velocity impact phenomena, edited by Ray Kinslow. Academic Press, New York and London, 1970
- 54 S. P. Marsh. LASL Shock Hugoniot Data. University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London, 1980
- 55 M. van hiel. Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-50108(1997)
- 56 徐锡申, 张万箱等。实用状态方程理论导引。北京: 科学出版社, 1986
- 57 陈熙蓉, 王可, 刘德润等. 冲击波在不同材料隔板中的衰减特征. 兵工学报, 1991, (2): 75-80
- 58 王海福, 冯顺山. 密实介质中冲击波衰减特性的近似计算. 兵工学报, 1996, 17 (1): 79-81
- 59 王芳, 冯顺山. FAE 战斗部毁伤威力评价的实验研究. 爆炸与冲击, 2006, 26 (2): 179-182