

“十二五”重点图书



研究生系列教材

燃烧、爆炸及 特种效应测试技术

郭三学 欧阳的华 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

研究生系列教材

燃烧、爆炸及特种效应测试技术

郭三学 欧阳的华 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍了含能材料及其制品的燃烧与爆炸性能的测试方法与步骤。内容包括爆炸物理参数的测试、爆炸物理参数的电探针法测试、波剖面的测试、火工品输出能力的定性测试、火工品输出能力与作用过程的定量测试、烟火药燃烧性能测试、药剂性能测试及特种效应测试等。书中包含大量公式、参数和图表,并附有相关参考文献。

本书可作为高等院校含能材料和弹药工程等相关专业学生的教材,亦可作为含能材料领域的研究人员、生产工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧、爆炸及特种效应测试技术/郭三学,欧阳的华编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2014.7

研究生系列教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3290 - 2

I. ① 燃… II. ① 郭… ② 欧… III. ① 燃烧—效应(化学)—测试技术—研究生—教材 ② 爆炸效应—测试技术—研究生—教材 IV. ① O643.2 ② O38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 065360 号

策划编辑 陈 婷

责任编辑 王 斌 陈 婷

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2014年7月第1版 2013年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 12

字 数 277千字

印 数 1~1000册

定 价 25.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3290 - 2/O

XDUP 3582001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

火炸药是一种具有许多优点的含能材料，无论是在军事上还是在国民经济建设中，均得到了极其广泛的应用。火炸药对外做功、形成特种效能等都是通过自身的燃烧或爆炸，因此学习掌握其燃烧、爆炸性能的测试技术就显得十分必要。

随着计算机技术、传感器技术等的发展，国内外相继出版了数十本与火炸药测试技术相关的著作，但是针对火炸药燃烧、爆炸性能测试方面的还较少。为了满足相关专业学生学习的需求，我们在收集和整理前辈对火炸药研究的成果的基础上编写了本书。

与现有的有关测试技术教材相比，本书在内容上对传感器与信号分析等理论知识论述较少，主要对火炸药燃烧、爆炸的相关性能参数的测试方法、原理与步骤进行了较系统而全面的论述，同时还对不同测试方法进行了比较，以期通过相关试验的介绍使学生更好地掌握火炸药燃烧、爆炸的基本理论与相关的基本操作技能，培养学生严谨的科学作风。

本书共 8 章，包括爆炸物理参数的测试、爆炸物理参数的电探针法测试、波剖面的测试、火工品输出能力的定性测试、火工品输出能力与作用过程的定量测试、烟火药燃烧性能测试、药剂性能测试及特种效应测试，对常用的测试方法和原理做了较详细的论述。

本书可作为高等院校火炸药、含能材料、弹药工程、非致命武器与警用器材等相关专业学生的教材，也可作为火炸药领域的研究人员、生产工程技术人员的参考资料。

本书收集和引用了国内外相关文献和资料，在此向所引用文献的作者表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请广大读者批评、指正。

编 者

2014 年 1 月

目 录

第 1 章 爆炸物理参数的测试	(1)
1.1 炸药爆速的测定	(1)
1.1.1 道特里么法	(1)
1.1.2 离子探针测时仪法	(1)
1.1.3 高速摄影法	(1)
1.2 冲击波参数的测定	(4)
1.2.1 一些基本理论问题	(4)
1.2.2 冲击波动力学参数的测定	(12)
1.3 爆轰波 C-J 压力的测定	(21)
1.3.1 自由表面速度法	(22)
1.3.2 激光干涉法	(25)
1.3.3 水箱法、二碘甲烷法	(31)
1.3.4 脉冲 X 射线摄影法	(32)
1.4 标准圆筒试验	(34)
1.5 炸药冲击波感度试验	(35)
1.5.1 隔板试验	(35)
1.5.2 楔试验	(36)
习题	(37)
第 2 章 爆炸物理参数的电探针法测试	(38)
2.1 常用的电探针	(38)
2.1.1 光杆探针	(39)
2.1.2 阳极化同轴镀膜探针	(39)
2.1.3 电离探针	(39)
2.1.4 压电探针	(40)
2.1.5 微型组合探针	(40)
2.2 炸药爆速的测定	(41)
2.2.1 爆轰产物的电导率	(41)
2.2.2 探针的装配	(42)
2.2.3 脉冲形成网络	(43)
2.2.4 时间间隔的记录	(45)
2.2.5 爆速测量精度的分析	(45)
2.3 探针法测定爆轰波 C-J 压力	(47)
习题	(49)

第 3 章 波剖面的测试	(50)
3.1 位移剖面的测试	(50)
3.2 速度剖面的测试	(52)
3.2.1 电阻丝传感器	(52)
3.2.2 电磁速度传感器	(53)
3.2.3 电磁径向速度传感器	(60)
3.2.4 电容传感器	(60)
3.3 应力剖面的测试	(64)
3.3.1 锰铜压阻应力传感器	(64)
3.3.2 异常热电效应应力传感器	(65)
3.3.3 电磁应力传感器	(67)
习题	(67)
第 4 章 火工品输出能力的定性测试	(68)
4.1 火工品输出能力的定性测试原理	(68)
4.2 火工品输出能力的铅板炸孔测试	(68)
4.2.1 测试目的	(68)
4.2.2 测试原理	(68)
4.2.3 测试仪器和装置	(69)
4.2.4 测试步骤	(69)
4.2.5 测试结果处理	(70)
4.3 火工品输出能力的钢块凹痕测试	(70)
4.3.1 测试目的	(70)
4.3.2 测试原理	(70)
4.3.3 测试仪器和装置	(70)
4.3.4 测试步骤	(71)
4.3.5 测试结果处理	(71)
4.4 火工品输出能力的隔板测试	(71)
4.4.1 测试目的	(71)
4.4.2 测试原理	(71)
4.4.3 测试仪器和装置	(72)
4.4.4 测试步骤	(72)
4.4.5 测试结果处理	(73)
4.5 火工品输出能力的金属柱压缩测试	(73)
4.5.1 测试目的	(73)
4.5.2 测试原理	(73)
4.5.3 测试仪器和装置	(74)
4.5.4 测试步骤	(74)
4.5.5 测试结果处理	(76)

4.6 几种常见测试方法的比较	(76)
习题	(77)
第5章 火工品输出能力与作用过程的定量测试	(78)
5.1 点火器输出性能测试	(78)
5.1.1 电点火器输出压力、压力上升时间的测试	(78)
5.1.2 电点火器点火延迟时间测试	(80)
5.2 雷管输出冲击波压力测试	(81)
5.2.1 受主材料	(81)
5.2.2 电磁法测试雷管输出压力	(82)
5.2.3 锰铜压阻法测试雷管输出压力	(84)
5.2.4 压阻法和应变法同时测试雷管输出压力	(88)
5.3 飞片输出能力测试	(89)
5.3.1 飞片雷管和雷管底部的破片	(89)
5.3.2 靶线法测试飞片动能	(90)
5.3.3 电磁法测试雷管底部破片输出	(91)
5.4 火工品作用过程测试	(93)
5.4.1 电雷管爆炸轴向冲击波波形测试	(93)
5.4.2 小剂量传爆药柱爆速增长过程测试	(95)
5.4.3 桥丝的爆炸过程测试	(96)
5.4.4 延期雷管作用过程测试	(97)
习题	(98)
第6章 烟火药燃烧性能测试	(99)
6.1 自发火温度测试	(99)
6.1.1 测试原理	(99)
6.1.2 测试用试剂和材料	(99)
6.1.3 测试仪器、设备和装置	(99)
6.1.4 测试准备	(100)
6.1.5 测试步骤	(100)
6.1.6 测试结果处理	(100)
6.2 燃烧温度测试	(101)
6.2.1 热电偶法	(101)
6.2.2 莫尔偏折法	(103)
6.2.3 非接触式红外测温法	(106)
6.3 燃烧速度测试	(109)
6.3.1 测试原理	(109)
6.3.2 测试方法	(110)
6.4 燃烧热测试	(113)
6.4.1 测试原理	(113)

6.4.2 测试装置	(114)
6.4.3 测试步骤	(114)
6.5 比容测试	(115)
6.5.1 测试原理	(115)
6.5.2 测试用试剂和材料	(115)
6.5.3 测试仪器、设备和装置	(115)
6.5.4 测试准备	(116)
6.5.5 测试步骤	(117)
6.5.6 测试结果处理	(117)
习题	(118)
第7章 药剂性能测试	(119)
7.1 药剂感度测试	(119)
7.1.1 撞击感度测试	(120)
7.1.2 摩擦感度测试	(128)
7.1.3 热感度测试	(134)
7.1.4 药剂起爆感度的砂试验测试	(137)
7.1.5 静电感度测试	(139)
7.1.6 发火点测试	(150)
7.2 安定性和相容性测试	(152)
7.2.1 安定性测试	(152)
7.2.2 相容性测试	(160)
习题	(166)
第8章 特种效应测试	(167)
8.1 宣传弹抛散效应测试	(167)
8.1.1 测试目的	(167)
8.1.2 测试仪器和设备	(167)
8.1.3 测试条件	(167)
8.1.4 测试程序	(167)
8.1.5 测试数据的处理	(168)
8.2 信号弹星光体火焰色度测试	(169)
8.2.1 测试目的	(169)
8.2.2 测试仪器和设备	(169)
8.2.3 测试条件	(169)
8.2.4 测试程序	(170)
8.2.5 测试数据的处理	(170)
8.3 信号弹弹道性能测试	(171)
8.3.1 测试目的	(171)
8.3.2 测试仪器和设备	(171)

8.3.3 测试条件	(171)
8.3.4 测试程序	(171)
8.3.5 测试数据的处理	(172)
8.4 声光弹发光强度测试	(172)
8.4.1 测试目的	(172)
8.4.2 测试原理	(173)
8.4.3 测试仪器和设备	(173)
8.4.4 测试条件	(173)
8.4.5 测试程序	(173)
8.4.6 测试数据的处理	(173)
8.5 声光弹声压级测试	(174)
8.5.1 测试目的	(174)
8.5.2 测试原理	(174)
8.5.3 测试仪器和设备	(174)
8.5.4 测试条件	(174)
8.5.5 测试程序	(174)
8.5.6 测试数据的处理	(175)
8.6 彩色发烟弹色度测试	(175)
8.6.1 测试原理	(175)
8.6.2 测试仪器和设备	(175)
8.6.3 测试准备	(176)
8.6.4 测试程序	(176)
8.6.5 测试数据的处理	(176)
8.7 爆炸式防暴弹冲击波压力测试	(177)
8.7.1 爆炸式防暴弹的爆炸现象	(177)
8.7.2 爆炸式防暴弹爆炸冲击波测试的原理	(179)
8.7.3 爆炸式防暴弹爆炸冲击波测试的装置	(180)
8.7.4 爆炸式防暴弹爆炸冲击波测试的注意事项	(180)
习题	(181)
参考文献	(182)

第 1 章 爆炸物理参数的测试

广义地讲,爆炸是指物质在有限体积内以极为迅速的方式进行能量释放的过程。其特点是高压气体或爆炸瞬间形成的高温、高压气体骤然膨胀,在爆炸点周围介质中发生急剧的压力突跃,从而产生破坏作用。描述爆炸及其作用的物理参数包括炸药的能量示性数、感度、爆轰参数、冲击波参数和应力波参数等。由于这些参数具有极高的瞬时性,因此要求研究手段也必须具备记录瞬时变化的能力。

转镜式高速摄影具有极高的响应速率、时间分辨率和空间分辨率,其记录结果形象直观,扫描速度可达到 $60\text{ mm}/\mu\text{s}$,摄影频率可达到 6×10^6 幅/秒。转镜式高速摄影在爆炸物理中的应用包括分幅摄影和扫描摄影两大类型。分幅摄影为揭示快速变化过程的物理实质和建立模型提供特别重要的试验依据,它在定量测定中较少采用,但是在图像处理装置逐步完善之后,在定量测定中必将进一步突显其重要性。扫描摄影归根到底是利用光扫描将快速过程展开在时空平面中,扫描速度方向为时间坐标方向。

除了发光的高速流逝过程可直接被高速摄影记录之外,大量不发光的高速流逝过程也可采用适当的方式将力学参数转变为光学参数被记录,这些方法包括发光间隙法、光导束法、光学杠杆法、阴影法等。本章将主要介绍采用光测法(转镜式高速摄影法)测试各爆炸物理参数的方法。

1.1 炸药爆速的测定

爆速是炸药性能参数中最重要的参数之一,也是目前能测到的最准确的一个参数。炸药爆速的测定方法主要有道特里么法、离子探针测时仪法和高速摄影法三种。

1.1.1 道特里么法

道特里么法是最古老的一种测定爆速的方法。其基本原理是通过与已知爆速的导爆索进行比较来测定未知炸药的爆速。

1.1.2 离子探针测时仪法

离子探针测时仪法的基本原理是利用炸药爆轰时爆轰波阵面的电离导电特性或压力突变,测定爆轰波依次通过药柱内(外)各探针所需的时间,从而计算并求得平均爆速(具体内容详见第 2 章)。

1.1.3 高速摄影法

炸药在引爆以后,爆轰波将沿炸药爆轰方向传播。爆轰波是一个带有化学反应区的强冲击波,高温和高压使爆轰产物发出强烈的光,爆轰引起空气中的冲击波阵面也发出强

光。高速摄影法利用高速摄影相机将爆轰波沿药柱移动的光信号感光到与爆轰方向做垂直运动的胶片上，两个速度合成后在胶片上得到一条曲线，根据曲线的斜率即可计算爆轰波在药柱中各点的爆速。其测定的方法如图 1-1 所示。

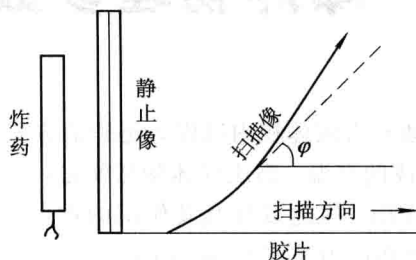


图 1-1 高速摄影法测定炸药爆速的示意图

将高速摄影机狭缝对准炸药柱轴线，炸药起爆后的光点移动随时间变化的轨迹被记录在胶片上。由静止像和实物的比较可以求得摄影放大率 β ，由扫描胶片可得 φ 角，于是炸药爆速为

$$D = \frac{v}{\beta} \tan \varphi$$

式中， v 为扫描速度，它由高速摄影机的参数和试验条件确定，有

$$v = 4\pi \cdot R \cdot n$$

式中， n 为转镜转速； R 为高速摄影机的扫描半径。

在测定炸药爆速时，应注意以下几个问题：

(1) 由于测定的是炸药表面发光点移动的速度，在非平面波起爆的情况下，参数之间的几何关系会使测定结果与真实爆速(沿轴线传播的爆速)之间有较大的差别，如图 1-2 所示。如果炸药自 O 点起爆，经过 t_1 时间后，波阵面到达 ABC 处，在 t_2 时刻到达 $A_1B_1C_1$ 处，则炸药爆速应为 $D = L_1 / (t_2 - t_1)$ ，而光测法测定的结果为 $D_1 = L / (t_2 - t_1)$ ；显然 $L > L_1$ ，因而 $D_1 > D$ ，这就是在扫描像的起始端所出现的情形。假如爆轰波永远以 O 为圆心传播，可以对实测的 D 根据几何关系加以修正。但是，试验证明，当爆轰波在炸药柱中传过 3.5 倍直径的距离以后，爆轰波阵面的曲率实际上是不变或变化很小的。因此为了测定真实的爆速，应当使用平面波发生器引爆炸药，或者至少要在离起爆端 3.5 倍直径外处开始测定。

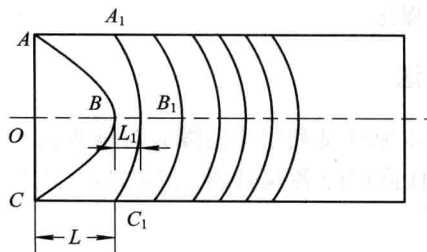


图 1-2 测定结果与真实爆速之间的差别

(2) 炸药由雷管或传爆药被起爆后，一般有一个爆轰不稳定段，如果传爆药的爆速比被测炸药的爆速慢，则爆轰不稳定段较短；若相反，则爆轰不稳定段较长。这个不稳定段

的长短大约是药柱直径的3倍。因此,如果测定炸药稳定爆轰的爆速,即使在使用平面波发生器起爆的情况下,也要在距起爆端3倍直径以外处开始测定。

(3) 由于炸药柱由粒状颗粒压制或由多种成分机械混合而成,爆轰波阵面出现不规则性,扫描照片的波前不够光滑,界限不够清楚,这给参数的判读带来影响。

为此可以将炸药装入由有机玻璃膜做成的管中,使被测的爆轰波扫描线规整。对于爆轰时发光较弱的炸药,尤其需要采取这一措施,因为冲击波会强烈压缩有机玻璃与炸药之间的空气层而使其发出强光。对于一些工业炸药,为了获得可被高速摄影机接收的光信号,曾采用如图1-3所示的方法。图1-3是里奥利特25炸药的爆轰波测试方法的示意图,在炸药的侧面每隔3 cm钻一个直径为6 mm的孔,把4号雷管锯断,放在该孔中,雷管装起爆药的一端向着炸药,对于直径 $d=6$ cm的里奥利特25炸药,这些孔以及雷管对于爆轰过程没有重大影响。例如,炸药的直径为6 cm,有孔和雷管时,临界传爆直径为4.5 cm,没有孔和雷管时为4.6 cm。

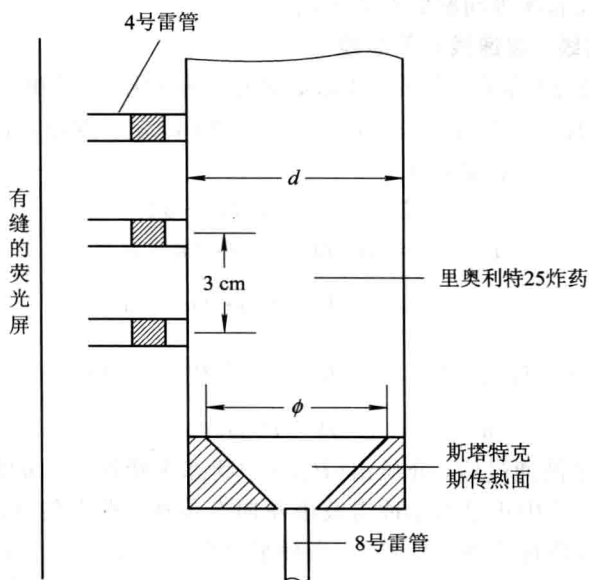


图1-3 里奥利特25炸药的爆轰波测试方法示意图

炸药爆速是炸药最基本、最重要的参数,因此人们采用各种方法去测定它。相比较而言,电探针法(电测法)可以获得最高的测量精度,但是目前采用的电探针法测定的是一段距离上的平均爆速,对于稳定爆轰时爆速的测定,显然以电测法最为优越。但是,对于不稳定爆轰时爆速的测定,电测法就不适合了,因为不可能将测量距离无限减小,而光测法可以求得任何瞬间的瞬时爆速,这对于起爆过程的研究或者燃烧转爆轰的研究特别有效。

从爆速测定的方法可以看到,高速摄像机的狭缝方向是一个空间尺度,被摄图像沿狭缝方向移动,在胶片上就形成直角坐标的空间坐标;而转镜的转动是光点在胶片上形成时间坐标,因此高速摄影法就是依靠转镜的转动将一维运动的光信号在胶片平面上沿时间展开的方法。

1.2 冲击波参数的测定

1.2.1 一些基本理论问题

炸药的爆轰产物向介质飞散,在介质中形成冲击波,而在爆轰产物中因其与介质的冲击阻抗比不同,会形成冲击波或稀疏波。冲击阻抗是介质动力硬度的标志,它是介质初始密度与介质中冲击波速度的乘积。炸药的冲击阻抗为 $\rho_0 D$ (ρ_0 为炸药密度, D 为爆速);介质的冲击阻抗为 $\rho_{0s} D_s$ (ρ_{0s} 为介质初始密度, D_s 为冲击波速度)。如果 $\rho_0 D > \rho_{0s} D_s$,则在爆轰产物中反射波为稀疏波;如果 $\rho_0 D < \rho_{0s} D_s$,则在爆轰产物中反射波为冲击波。

冲击波基本关系式是冲击波参数测定的理论基础,同时冲击波参数的测定不但检验了理论,而且已经成为试验研究介质的冲击压缩性、状态方程、炸药爆轰波 C-J 端爆轰波结构、高速碰撞、冲击波起爆等问题的有效手段。

1. 冲击波的极曲线、波速线和等熵线

冲击波在介质中通过的前后,介质的状态要发生突跃变化,介质由初态时 (P_0, ρ_0, e_0, u_0) 突跃为 (P, ρ, e, u) (其中, P_0 表示压力; ρ_0 表示密度; e_0 表示内能; u_0 表示质点速度)。波前、波后由三个基本关系式联立,有

$$\rho_0 (D_s - u_0) = \rho (D_s - u) \quad (1-1)$$

$$P - P_0 = \rho_0 (D_s - u_0) \cdot (u - u_0) \quad (1-2)$$

$$e - e_0 = \frac{1}{2} (P + P_0) \cdot (u_0 - u) \quad (1-3)$$

将式(1-1)中的 D_s 解出,代入式(1-2),并将 $\rho = \frac{1}{u}$ 代入则得到

$$u - u_0 = \pm (P - P_0) \cdot (u_0 - u) \quad (1-4)$$

式(1-4)说明冲击波通过后,介质由 (P_0, u_0) 状态突跃到 (P, u) 状态,同时介质质点速度也由 u_0 突跃到 u 。式中正号表示冲击波由左向右传播,即右传冲击波;负号表示冲击波由右向左传播,即左传冲击波。在 $P-u$ 坐标平面内,有通过同一初始状态点 $O(P_0, u_0)$ 的两条曲线。图 1-4 中曲线 OA 为式(1-4)中取正号时的曲线, OB 是其取负号时的曲线,这两条曲线称为 $P-u$ 平面内冲击波的兰钦-雨果尼奥曲线,也称为冲击波的极曲线。

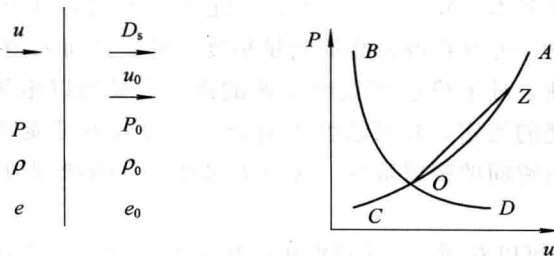


图 1-4 冲击波的极曲线、波速线和等熵线

由式(1-2),冲击波相对于以 u_0 运动的介质的速度为

$$(D_s - u_0) = \frac{P - P_0}{(u - u_0) \rho_0}$$

将 ρ_0 移到左边, 得

$$(D_s - u_0)\rho_0 = \frac{P - P_0}{(u - u_0)} \quad (1-5)$$

式中, $(D_s - u_0)\rho_0$ 为以 (P_0, u_0) 为起点、以 (P, u) 为终点的直线 OZ 的斜率, 斜率不同的斜线代表不同速度的冲击波, 这些斜线称为波速线。

冲击波通过后, 介质由原始状态点 $O(P_0, u_0)$ 突跃变化到终态点 $Z(P, u)$, 这个冲击波的速度由波速线 OZ 的斜率决定。或者说, 当冲击波的速度确定以后, 以 $(D_s - u_0)\rho_0$ 为斜率, 过 O 点做的斜线与极曲线的交点 $Z(P, u)$ 的状态, 就是冲击波通过介质突跃到的状态。

如果在介质中传播的是稀疏波, 则稀疏波通过后, 介质将由 $O(P_0, u_0)$ 状态变为压力更低的状态, 介质的质点也得到一个与稀疏波传播方向相反的附加速度 u_r

$$u_r = \int_{u_0}^u du = \pm \int_{P_0}^P \frac{dP}{\rho \cdot C}$$

式中, P 为爆轰波密度; C 为热焓参数, 显然

$$u - u_0 = u_r = \pm \int_{P_0}^P \frac{dP}{\rho \cdot C} \quad (1-6)$$

在 $P-u$ 坐标平面内, 式(1-6)由曲线 OC 和 OD 表示, OC 表示稀疏波由左向右传播, 对应于取正号的情况; OD 表示稀疏波由右向左传播, 对应于取负号的情况。稀疏波是一个等熵膨胀过程, 因此 OC 和 OD 为 $P-u$ 坐标平面内的等熵线。等熵线表示稀疏波过后, 介质状态沿此曲线逐渐变化。

2. 平面冲击波在分界面上的反射

图 1-5 为平面冲击波的冲击绝热曲线, 在介质 I 中传播的冲击波 D_1 到达分界面后向介质 II 传播一冲击波 D_2 , 同时在介质 I 中反射一冲击波或稀疏波 D'_1 。假定介质 I 和 II 的冲击压缩性方程分别为

$$D_1 = a_1 + b_1 u_1 \quad (1-7)$$

$$D_2 = a_2 + b_2 u_2 \quad (1-8)$$

式中, a 和 b 为常数, 可由常数表查出, 大多数密实介质, 冲击波速度 D 与介质点速度 d 成线性关系, 即 $D = a + bu$ 。其中 a 和 b 是与材料性质有关的常数。

由式(1-2), 在 $P_0 = 0, u_0 = 0$ 时, 有

$$P_1 = \rho_{01} D_1 u_1$$

将 $D_1 = a_1 + b_1 u_1$ 代入, 得

$$P_1 = \rho_{01} (a_1 + b_1 u_1) u_1 \quad (1-9)$$

式(1-9)也称为雨果尼奥方程, 它与式(1-4)是等价的。由式(1-9)可以在 $P-u$ 平面内作出冲击绝热曲线 I (简称曲线 I), 也即雨果尼奥曲线, 如图 1-5 所示。由于 $P_{01} = 0, u_{01} = 0$, 因此曲线 I 是过原点的。当已知入射冲击波速度 D_1 时, 以 $\rho_{01} \cdot D_1 = \tan \alpha_1$ 为斜率过坐标原点做一条直线, 它与曲线 I 的交点 N 的状态 (P_1, u_1) 就是冲击波在介质 I 中通过后介质 I 突跃到的状态。

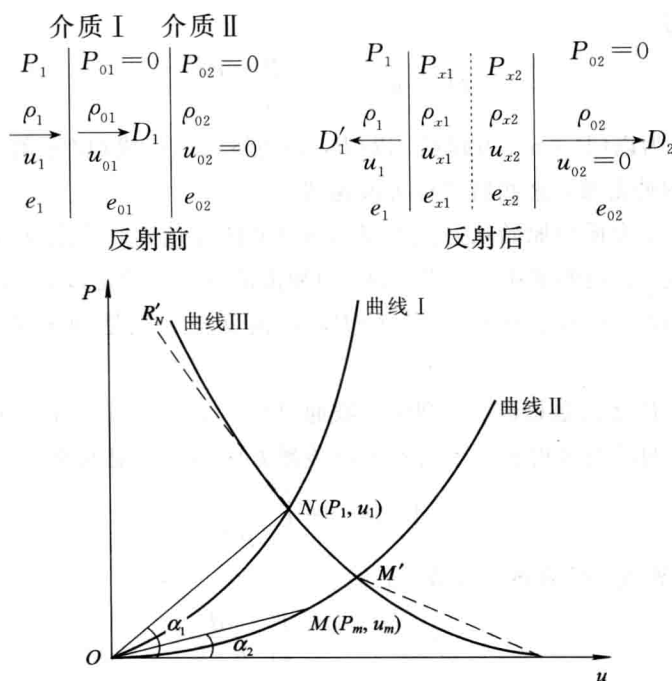


图 1-5 冲击绝热曲线

冲击波在介质 I 和介质 II 的分界面处反射后,如果在介质 I 中形成反射冲击波 D'_1 ,则这一反射冲击波是在已被冲击波 D_1 压缩过的介质中传播的,它的初始状态为 (P_1, u_1) 。在 $P-u$ 坐标平面内,反射冲击波 D'_1 传过后的状态应当由以 (P_1, u_1) 为起点的一条左传的冲击绝热线决定,如图 1-5 所示的曲线 R'_N 。然而大多数固体物质的初始密度较大,当入射冲击波传过后,结构变得更加致密;当反射冲击波传过时,引起的熵值增加很小,以致可以忽略不计。因此介质 I 中反射冲击波的冲击绝热线与入射冲击波的冲击绝热线近似地呈镜像对称,如图 1-5 所示的冲击绝热线 III (简称曲线 III)。它与曲线 R'_N 十分接近,因此常以过点 $N(P_1, u_1)$ 与曲线 I 对称的曲线 III 代替曲线 R'_N 。

当冲击波到达界面时,向介质 II 中传播冲击波 D_2 ,冲击波在介质 II 中传播后介质 II 的状态由它的冲击绝热方程决定,有

$$P_2 = \rho_{02}(a_2 + b_2 u_2)u_2 \quad (1-10)$$

在 $P-u$ 坐标平面内,可作出介质 II 的冲击绝热曲线 II (简称曲线 II)。曲线 II 处于曲线 I 的上方或者处于曲线 I 的下方,由这两种介质的性质决定。

在介质分界面处,分界面两侧的压力应相等,质点速度也应相等,即 $P_{x1} = P_{x2}$, $u_{x1} = u_{x2}$,可见这时的状态既应处于反射冲击波的冲击绝热线 III 上,也应处于介质 II 中透射冲击波的冲击绝热线 II 上。也就是说此时的状态必定在曲线 III 和曲线 II 的交点 M 处,这一点的坐标 (P_m, u_m) 就是分界面的状态参数,即

$$P_{x1} = P_{x2} = P_m, u_{x1} = u_{x2} = u_m$$

假如介质 II 的冲击绝热方程是未知的,无法做出曲线 II,为了确定分界面状态参数,可以测定介质 II 中冲击波速度 D_2 ,以 $\rho_{02} D_2 = \tan \alpha_2$ 为斜率,过坐标原点做直线 OM, M 点的坐标就是分界面的状态参数,也即介质 II 中冲击波 D_2 通过后到达的状态。相反,当已知介

质Ⅱ的冲击绝热线Ⅱ时,过曲线Ⅰ和曲线Ⅱ的交点 M 与坐标原点作一直线,测出 α_2 角,就可以计算出冲击波进入介质Ⅱ后的速度为

$$D_2 = \frac{1}{\rho_{02}} \tan \alpha_2$$

介质Ⅰ和介质Ⅱ的冲击阻抗分别为 $\rho_{01} D_1$ 和 $\rho_{02} D_2$,由图1-5可见,显然 $\rho_{01} D_1 > \rho_{02} D_2$,这说明介质Ⅱ的冲击阻抗较介质Ⅰ的大,由状态 $N(P_1, u_1)$ 到 $M(P_m, u_m)$ 的过程应为等熵膨胀过程;由介质Ⅰ的等熵膨胀线决定分界面的状态,即由 N 为起始点的等熵膨胀线 NM' 。研究证明,在压力 $P_1 < 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 的情况下,曲线 NM' 和曲线 NM 可近似为一条曲线,由此造成的偏差很小,因此在工程应用中,常以冲击绝热线Ⅲ代替等熵膨胀线 R'_N (即 NM')。

总之,在工程应用中,采取了一些近似处理的措施,使问题的解决得到简化,这就是在介质中的反射冲击波的雨果尼奥曲线用入射冲击波的雨果尼奥曲线做近似代替。即以入射冲击波阵面状态点为起始点做入射冲击波雨果尼奥曲线的镜像对称线,就近似为反射冲击波的雨果尼奥曲线。

若反射波为稀疏波时,反射稀疏波的等熵膨胀线也用入射冲击波的冲击绝热线的镜像对称线做近似代替。

此外在处理冲击波在分界面处反射的问题时,忽略了材料的固有强度,而假定为理想流体,这对于高速碰撞,当入射冲击波的压力大于 10^5 kg/cm^2 时,引起的偏差可以忽略不计;但当压力较低时,冲击波将引起较大的误差。

3. 高速碰撞时冲击波的初始参数

高速碰撞是研究物质动态压缩性规律的重要手段之一,以一维平面碰撞为例,说明各个参数间的关系,为试验研究打下基础。

假定一个以 u_d 速度运动的弹撞击静止的靶,弹受到靶的阻挡,速度由 u_d 变为分界面的速度 u_x ,如图1-6所示。

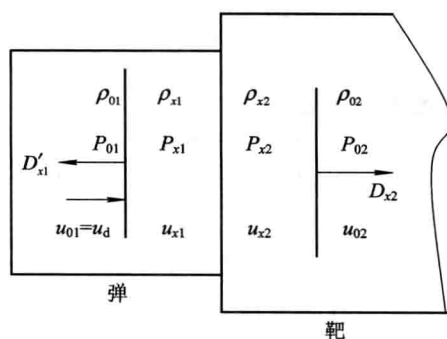


图1-6 速度由 u_d 就变为分界面的速度 u_x 的示意图

分界面的压力由0突变到 $[P_{x2}, (P_{x2} : P_{x1})]$ 在靶中形成一个冲击波 D_{x2} ,在弹中形成一个左传的冲击波 D'_{x1} 。

对于靶中形成的右传冲击波 D_{x2} ,其连续方程和动量方程分别为

$$\rho_{02} D_{x2} = \rho_{x2} (D_{x2} - u_{x2}) \quad (1-11)$$

$$P_{x2} = \rho_{02} D_{x2} u_{x2} \quad (1-12)$$

对于在弹中形成的左传冲击波,有

$$\begin{aligned}\rho_{01}(-D'_{x1}-u_d) &= \rho_{x1}(-D'_{x1}-u_{x1}) \\ \rho_{01}(D'_{x1}+u_d) &= \rho_{x1}(D'_{x1}+u_{x1})\end{aligned}\quad (1-13)$$

$$P_{x1} = \rho_{01}(D'_{x1}+u_d) \cdot (u_d - u_{x1}) \quad (1-14)$$

令 $\xi_2 = \frac{\rho_{02}}{\rho_{x2}}$, 由式(1-11)可求得

$$D_{x2} = \frac{u_{x2}}{1 - \xi_2} \quad (1-15)$$

代入式(1-12)有

$$P_{x2} = \frac{\rho_{02} \cdot u_{x2}^2}{1 - \xi_2} \quad (1-16)$$

由式(1-13)和 $\xi = \rho_{01}/\rho_{x1}$ 有

$$D'_{x1} = \frac{\xi_1 u_d - u_{x1}}{1 - \xi_1} \quad (1-17)$$

代入式(1-14)有

$$P_{x1} = \frac{(u_d - u_{x1})^2}{1 - \xi_1} \quad (1-18)$$

在分界面处,压力和质点速度连续,有

$$\begin{aligned}P_{x1} &= P_{x2} \\ u_{x1} &= u_{x2}\end{aligned}$$

由式(1-16)和式(1-18)可求得

$$u_{x1} = u_{x2} = \frac{u_d}{1 + \sqrt{\frac{\rho_{02}(1 - \xi_1)}{\rho_{01}(1 - \xi_2)}}} \quad (1-19)$$

把式(1-19)代入式(1-16)得

$$P_{x1} = P_{x2} = \frac{\rho_{02} u_d^2}{1 - \xi_2} \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\rho_{02}(1 - \xi_1)}{\rho_{01}(1 - \xi_2)}} \right]^{-1} \quad (1-20)$$

当弹和靶的材料冲击绝热方程已知时,如

$$\begin{aligned}D'_{x1} &= a_1 + b_1 u_{x1} \\ D_{x2} &= a_2 + b_2 u_{x2}\end{aligned}$$

则

$$P_{x2} = \frac{\rho_{02} a_2^2 (1 - \xi_2)}{(b_2 - 1)^2 \left(\frac{b_2}{b_2 - 1} \xi_2 - 1 \right)^2} \quad (1-21)$$

$$P_{x1} = \frac{\rho_{01} a_1^2 (1 - \xi_1)}{(b_1 - 1)^2 \left(\frac{b_1}{b_1 - 1} \xi_1 - 1 \right)^2} \quad (1-22)$$

当弹和靶用相同材料时, $\rho_{01} = \rho_{02}$, $\xi_1 = \xi_2$, 由式(1-19)可求得

$$u_{x2} = \frac{1}{2} u_d \quad (1-23)$$

式(1-23)是十分重要的结论,它表明在使用相同材料进行碰撞时,弹和靶分界面处的