

硐室大爆破 填塞物动力学导论

林大泽 著

地质出版社

本项目研究得到中国博士后基金会
本著作出版得到贵州工业大学

资助

硐室大爆破填塞物动力学导论

林大泽 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

作者以工程经验为背景,应用力学相似原理和计算机模拟技术,对硃室大爆破填塞物动力学问题进行深入和系统的研究,本书为总结。书中第1章介绍了接触爆破现象,介绍一定数量的装药接触目标爆炸作用在目标上的荷载有多大,目标在多大的荷载作用下方能产生一定程度的破坏。第2章介绍了内部爆破,介绍固体介质的爆破机理,药量计算和填塞的作用问题。第3章介绍了作者对硃室大爆破填塞物运动研究的理论成果。第4章运用数值模拟方法模拟填塞物爆破阻塞效应,考察填塞物附近及其作用方向的爆炸应力场、速度场情况,特别是填塞物端部顶点情况。第5章介绍了采用当今先进的全息动光弹测试系统,对药包药室最佳装药不耦合系数的实验研究成果。

图书在版编目(CIP)数据

硃室大爆破填塞物动力学导论/林大泽著. —北京:
地质出版社, 2004.1

ISBN 7-116-03998-8

I. 硃... II. 林... III. 硃室爆炸-动力学
IV. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 063920 号

责任编辑 陈军申

责任校对 李 玫

出版发行 地质出版社

社址邮编 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话 (010) 82324508 (邮购部)

网 址 <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱 zhs@gph.com.cn

传 真 (010) 82310759

印 刷: 北京印刷学院实习工厂

开 本: 787 mm × 1092 mm^{1/16}

印 张: 6.5

字 数: 150 千字

印 数: 1—1100 册

版 次: 2004 年 1 月北京第一版·第一次印刷

定 价: 16.00 元

ISBN 7-116-03998-8/T·112

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

前 言

硃室大爆破在我国国民经济中发挥的巨大作用是有目共睹的。今后的几十年,在我国基础设施建设中,如矿山、机场、港口、铁路、电站、公路、房地产及南水北调等工程中,它仍将有广阔的应用前景。近几年在西部大开发中,尤其在高原缺氧地带,硃室爆破发挥了独特的作用,越来越受到大家的广泛关注。国内外学者对硃室大爆破进行了大量的研究工作,但在填塞问题方面的研究却很少,主要集中于工程经验的总结,其理论方面的工作尚属空白,这主要是由于实验手段和数学上遇到了不少难于克服的困难。填塞作为硃室大爆破最后一道工序,它关系到安全、经济和可靠。本书以工程经验为背景,应用力学相似原理和计算机模拟技术,对硃室大爆破填塞岩石动力学问题进行了深入和系统的研究。其主要研究成果通过了部级鉴定,填补国内外空白,达到了国际领先水平。作者研究了在一定数量的装药接触目标爆炸,作用在目标上的荷载有多大,目标在多大的荷载作用下方能产生一定程度的破坏,从中推导出药量计算公式;研究了固体介质的爆破机理,探讨了药量计算和填塞的作用问题;在理论上对硃室大爆破填塞物运动的研究时发现填塞物运动应按静态条件简化计算,而不应按冲击条件考虑;运用量纲分析和运动相似性判据,得出硃室大爆破填塞物运动相似性判据新的药室填塞长度原则;数值模拟了填塞物爆破阻塞效应,考察填塞物附近及其作用方向的爆炸应力场、速度场情况,特别是填塞物端部顶点情况;利用全息动光弹测试系统,对药包药室最佳装药不耦合系数进行了实验研究。这些成果在作者主持的许多重要工程得到了应用,如中央最大援藏项目——西藏满拉水利枢纽建设工程、青藏铁路建设工程、长江防洪堤建设工程等,都发挥了重要作用。这些是作者最为自豪的人生经历。

斯蒂芬·茨威格曾在《人类群星闪烁时》中写到:“一个人命运中最大的幸运,莫过于在他人生中途,即他年富力强的时候发现了自己生活的使命。”今天,我比任何时候更加热爱我的祖国和我的家乡——中国西部。非常幸运的是,此时我正在中国西部这个充满神奇、充满诱惑和充满希望的土地上奉献着我的一切。这本著作的出版,是对我近年教学和科研工作的总结。这项研究工作大约进行了十年时间,许多同事和我指导过的博士后、博士生、硕士生以及本科生参加了其中的一些工作,在此一并感谢!还要感谢我的老师和领导,他们一直鼓励和支持我不懈的追求,如中国人民解放军总参谋部科技委副主任钱七虎院士、北京市副市长范伯元教授、中国科协书记处书记冯长根教授、贵州工业大学校长朱立军教授、西南科技大学常务副校长肖正学教授、原武汉科

技大学校长陆寿慈教授、北京科技大学副校长蔡希亮教授、南京理工大学副校长吕春绪教授、原中国人民公安大学副校长宋子堃和朱启禄教授；还要特别感谢我的博士导师、原北京理工大学副校长兼研究生院院长丁徽教授；以及辛勤培养我的——四川省三台县先锋小学、四川省三台县石安中学、四川省三台中学、中国人民解放军理工大学、北京理工大学和北京科技大学等母校教我的所有老师。

作者

2003年6月于北京

目 录

前 言

第 1 章 接触爆破	(1)
1.1 起爆点的位置	(1)
1.2 装药形状	(3)
1.3 爆炸冲量计算	(7)
1.4 破坏现象	(15)
1.5 等效药量	(16)
1.6 接触爆破对装药设置的一般要求	(20)
第 2 章 内部爆破	(21)
2.1 脆性固体介质的爆破机理	(21)
2.2 药量计算公式	(24)
2.3 填塞	(30)
第 3 章 填塞长度的研究	(32)
3.1 硐室爆破应用情况	(32)
3.2 国内外硐室大爆破问题研究现状	(33)
3.3 条形药包爆破现状	(35)
3.4 硐室大爆破填塞问题处理方法	(37)
3.5 硐室大爆破研究主要方法	(38)
3.6 本书研究的方法和主要内容	(39)
3.7 填塞长度的理论研究	(39)
3.8 药室填塞长度实用设计及新的设计原则	(45)
3.9 计算实例及其分析	(46)
第 4 章 硐室大爆破填塞物阻塞效应的数值模拟	(65)
4.1 概述	(65)
4.2 基本方程及其离散化	(67)

4.3	材料模型·····	(70)
4.4	计算内容·····	(71)
4.5	计算尺寸及网络划分·····	(71)
4.6	数值模拟结果·····	(73)
4.7	计算结果分析·····	(87)
4.8	主要结论·····	(87)
第5章	不耦合装药的全息动光弹实验研究 ·····	(89)
5.1	国内外最佳装药不耦合系数的全息动光弹实验研究现状·····	(89)
5.2	本书所介绍全息动光弹实验系统·····	(90)
5.3	装药耦合系数实验·····	(90)
5.4	结论·····	(97)
参考文献	·····	(98)

第1章 接触爆破

装药至少以其一个面与目标表面直接接触的爆破,称为接触爆破。根据爆炸作用理论,在装药与目标接触或距目标极近的情况下,即 $R_0 \leq r \ll 12R_0$ (R_0 为球形装药半径, r 为装药中心至目标的距离),装药的爆炸作用主要是爆炸产物对目标的直接作用。硐室大爆破堵塞处的爆炸现象可以从局部认为是一种接触爆破,所以接触爆破的研究也是属于硐室大爆破堵塞物动力学问题^①。

在爆炸产物作用下,目标在与装药接触的部位及其周围发生局部破坏。本章讨论的主要问题是:一定数量的装药接触目标爆炸,作用在目标上的荷载有多大;目标在多大的荷载作用下方能产生一定程度的破坏,从中推导出药量计算公式。

1.1 起爆点的位置

在接触爆炸中,起爆点的位置决定爆轰波在装药中的传播方向,影响爆炸荷载和爆破效果。

1.1.1 起爆点位置对爆轰波传播方向的影响

目前,在爆破中装药是由雷管起爆的。由于雷管内的高级炸药数量很少、体积很小,所以雷管对装药的起爆属于点引爆。

点引爆形成的爆轰波波阵面在装药中以球面扩展,其传播方向总是垂直于波阵面的。

爆轰波在无限大的装药中传播时,随着波的扩展,波阵面的曲率半径逐渐增大;离起爆点越远,波阵面上的局部越接近平面。由一端起爆的圆柱形装药,除边缘部位因受侧向稀疏波的影响而使波阵面明显变化外,就整个爆轰波面来说仍然是球面波,其曲率半径只在最初随传播距离的增加而增大,而在装药中的传播距离超过某一极限值后,曲率半径就接近一个恒定的值。所以,不论是无限大的装药,还是有限尺寸的装药,爆轰波在其中的传播方向都是垂直波阵面的。

爆轰波的传播方向是由起爆点的位置决定的。将同样的装药设置在相同的目标上,分别从三个不同的位置起爆,爆轰波传播方向各不相同。

1.1.1.1 起爆点位于装药的上面中央

如图 1.1a 所示,起爆点的位置在 A_1 ,爆轰波在装药中以球面波沿箭头指示的方向朝着目标传播。在装药的底面中央 B_1 ,波的传播方向垂直目标表面;而在底面上的其余各点,波的传播方向皆与目标的法线倾斜不同的角度。由于倾斜角度不大,在近似分析中可将其忽略,把爆轰波以球面波传播简化为以平面波传播,如图中的 M_1N_1 那样。在这种情况下,爆轰波的传播方向完全垂直目标,称为垂直入射。

① 沈贤凯. 固体介质中爆炸理论基础(下册). 中国人民解放军工程兵工程学院. 1981 年。

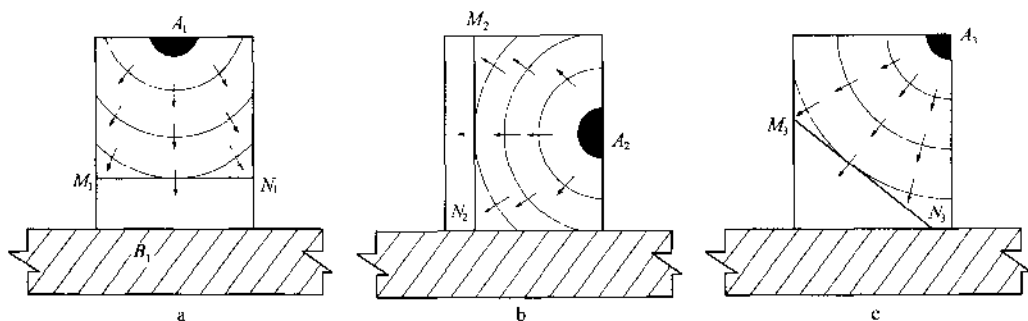


图 1.1 起爆点的位置与爆轰波的传播方向

1.1.1.2 起爆点位于装药的侧面中央

如图 1.1b 所示,起爆点的位置在 A_2 ,爆轰波在装药中沿箭头方向大致平行目标表面向左传播。在装药与目标接触的部位,爆轰波的传播方向与目标表面倾斜的角度不大,当忽略了倾斜角度后,爆轰波以球面波传播简化为以平面波传播,如图中的 M_2N_2 那样。在这种情况下,爆轰波的传播方向完全平行目标表面,称为切向入射。

1.1.1.3 起爆点位于装药的上方边缘

如图 1.1c 所示,起爆点的位置在 A_3 ,爆轰波向斜下方传播。它既不是垂直入射,也不是切向入射,而是介于这两种情况之间。如将球面波传播简化为平面波传播,则爆轰波阵面与目标表面倾斜成一定的角度 β 。

1.1.2 爆轰波的传播方向对爆炸荷载的影响

起爆点的位置不同,爆轰波的传播方向也不相同。这样,爆轰波与目标表面的相互作用出现了明显的差异^①。

1.1.2.1 垂直入射的爆轰波与目标的相互作用

假设装药与目标(金属)的宽度是半无限的,这样就不必考虑横向膨胀的问题。如图 1.2 所示,当爆轰波垂直入射、波阵面到达金属表面时,便在金属中形成了向内部传播的冲击波。金属表面 MN 沿爆轰波阵面运动方向平行移动,经过很短时间后的位移为 Δ 。同时,在 MN 与冲击波阵面 EF 之间出现了随时间增加而扩大的受压区。冲击波的传播速度和金属质点的运动速度都随受压区中压力的增加而增大;而受压区中的压力又取决于爆轰产物的压力和爆炸产物与金属之间的相互作用。

在爆轰波垂直入射时,装药与金属接触面上的压力每平方厘米可达 $(2.35 \sim 6.17) \times 10^6 \text{ N}$;金属表面质点的速度约为 $480 \sim 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这说明炸药对金属表面的作用,在猛烈程度上与高速弹丸的冲击作用几乎是等效的。

1.1.2.2 切向入射的爆轰波与目标的相互作用

当爆轰波切入射时,其传播方向与金属表面平行(图 1.3)。在金属中形成的冲击波波阵面与金属表面之间的角度为 $30^\circ \sim 40^\circ$,波阵面之后是受压区。在这种情况下,装药与金属接触面上的压力比垂直入射时小得多。

1.1.2.3 倾斜入射的爆轰波与目标的相互作用

当爆轰波倾斜入射时,与目标的相互作用介于垂直入射与切向入射之间。在这种情况

① 林学圣。土岩爆破。中国人民解放军工程兵工程学院。1984。

下, 爆轰波在目标表面所造成的压力 (p) 随着爆轰面与目标表面之间的角度 (β) 发生变化。 $\beta \approx 0$, 爆轰波接近垂直入射, 在金属表面上所造成的压力最高; 随着 β 的增大, 爆轰波变为倾斜入射, 压力降低; 当 $\beta = 90^\circ$ 时, 爆轰波切向入射, 表面上的压力最小。

1.1.3 起爆点的最优位置

以上的讨论说明: 变换起爆点的位置, 爆轰波的传播方向发生变化, 在目标表面所造成的压力也发生变化。

爆破是利用装药的爆炸作用破坏目标的。爆炸作用的强弱表现为对目标造成的压力的大小。压力越大, 目标越容易破坏。因此, 确定起爆点的最优位置, 应以对目标造成最大的压力为准则。

欲对目标造成最大的压力, 就必须使爆轰波

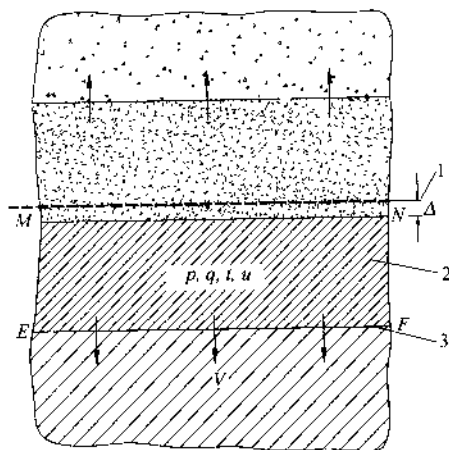


图 1.2 垂直入射的爆轰波与金属表面的相互作用

1—炸药与金属的分界面; 2—受压区;
3—冲击波波阵面

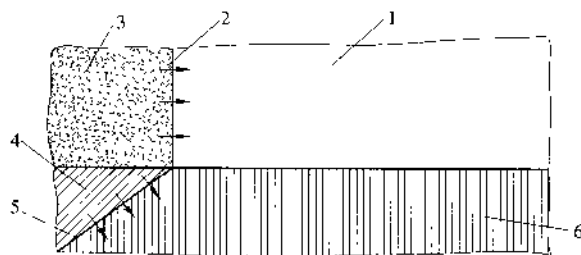


图 1.3 切向入射的爆轰波与金属表面的相互作用

1—未爆炸的炸药; 2—爆轰波波阵面; 3—爆炸生成物;
4—受压区; 5—冲击波波阵面; 6—金属

垂直入射。综上所述, 可得出以下结论: 在接触爆破中, 集团装药的最优起爆位置是在装药同目标接触面的对面中央 (如图 1.1a 中的 A_1)。

1.2 装药形状

在接触爆破中, 装药形状对其有效利用率和爆炸作用荷载都有显著的影响。

1.2.1 装药形状的分类

装药形状一般是根据集中系数的大小进行区分。

集中系数按下式计算:

$$\Phi = \frac{0.62 \sqrt[3]{V_Q}}{R_1} \quad (1.1)$$

式中: Φ ——装药的集中系数; V_Q ——装药的体积 (m^3); R_1 ——由装药的几何中心到表

面上最远一点的距离 (m)。

集中系数 $\Phi \geq 0.47$ 的装药称为集团装药； $\Phi < 0.47$ 的装药称为直列装药（也称延长装药）。

集团装药按几何形状分为以下几种：

- (1) 球形装药，其 $\Phi = 1.0$ ；
- (2) 直立圆柱体装药，其 $\Phi = 0.47 \sim 0.81$ ；
- (3) 立方体装药，其 $\Phi = 0.71$ 。

直列装药按横截面的形状分为：矩形截面的直列装药和圆形截面的直列装药。它们的几何特征是长度大于横截面中最大边长的 4 倍以上（实际上有的达 100 多倍），集中系数为 $0 < \Phi < 0.41$ 。

1.2.2 装药与目标的接触面

不同的装药形状同爆破目标之间的接触状况是不相同的。按照接触面的大小，装药同爆破目标之间的接触状况分为：点接触、线接触和面接触。

1.2.2.1 点接触

装药同目标只有一个接触点。例如，球形装药与平板的接触点即是点接触。

1.2.2.2 线接触

装药与目标接触的部位是一条线（直线或曲线）。如：爆破筒（圆形截面的直列装药）与钢板的接触（呈直线），磁性水雷与舰舷的接触（呈曲线）都是线接触^①。

1.2.2.3 面接触

装药与目标至少有一个接触面。直立圆柱体装药、立方体装药和矩形截面的直列装药同目标的接触都是面接触。

理论与实践表明：适当增大装药与目标的接触面，装药的利用率高，作用在目标上的爆炸荷载大。

与目标成点接触的球形装药，利用率最低，作用荷载最小，爆破效果差；而且难以控制。因此，在接触爆破中，球形装药的实用价值不大。

与目标成线接触的圆形截面的直列装药，其利用率和爆炸作用荷载虽然比球形装药稍好，仍不及集团装药。但是，它易于制造加工，便于携带、使用。所以，有些装备器材也采用这种装药形状。

与目标成面接触的集团装药和直列装药，其利用率和作用荷载都优于上述两种装药形状，特别是立方体集团装药和矩形截面的直列装药可用现有的制式药块捆包而成，也便于设置。因此，广泛应用在接触爆破中。

1.2.3 装药形状对利用率的影响

1.2.3.1 装药的利用率及其计算公式

接触爆破时，只有朝向目标飞散的爆炸产物才有破坏作用。相应地，形成这部分爆炸产物的装药体积称为装药的有效体积。

装药的利用率 (η) 是装药的有效体积 (V_1) 与装药体积 (V_0) 之比，即：

$$\eta = V_1/V_0 \quad (1.2)$$

① Proceedings of the Fourth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Austria, 1993.7.

式中： η ——装药的利用率； V_0 ——装药体积， m^3 ； V_1 ——装药的有效体积， m^3 。

根据爆炸作用理论的有关假设，直立圆柱体（直径为 b 、高为 H ）集团装药和底面为正方形（边长 $b \times b$ ，高为 H ）的集团装药，其有效利用率与装药的几何尺寸 b/H 有关，可用下式计算：

$$\eta = \begin{cases} \frac{b}{6H} & \frac{b}{H} < 1 \end{cases} \quad (1.3A)$$

$$\eta = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{H}{2b} + \frac{H^2}{6b^2} & \frac{b}{H} \geq 1 \end{cases} \quad (1.3B)$$

底面长为 l 、宽为 b ($l > b$)、高为 H 的矩形截面直列装药，其利用率不仅与 b/H 有关，而且与 l/b 有关。其计算公式为：

$$\eta = \begin{cases} \frac{3b(l-b) + 2b^2}{12lH} & \frac{b}{H} < 1 \end{cases} \quad (1.4A)$$

$$\eta = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{H}{4b} - \frac{H}{4l} + \frac{H^2}{6lb} & \frac{b}{H} \geq 1 \end{cases} \quad (1.4B)$$

在公式 (1.4) 中，当 $l = b$ 时，即可得出直立圆柱体集团装药和底面为正方形集团装药的利用率计算公式 (1.3)。所以，公式 (1.4) 是在面接触情况下计算装药利用率的普遍公式。

1.2.3.2 装药的利用率随装药形状变化的规律

从公式 (1.3)、公式 (1.4) 中可以看出，装药形状对利用率的影响，具体体现在 η 随 $\frac{b}{H}$ 和 $\frac{l}{b}$ 的改变而变化。表 1.1 列出了变化的具体数据。

表 1.1 装药利用率 η 随 b/H 、 l/b 的变化

装药的形状		直立圆柱体或 $b \times b \times H$							
		矩形截面的直列装药 ($l \times b \times H$)							
l/b		1.0	2.0	4.0	8.0	10.0	20.0		∞
利用率 η	$\frac{b}{H} = 0.5$	0.083	0.104	0.114	0.120	0.121	0.123		0.125
	$\frac{b}{H} = 1.0$	0.167	0.208	0.229	0.240	0.242	0.246		0.25
	$\frac{b}{H} = 2.0$	0.292	0.333	0.354	0.365	0.367	0.371		0.375
	$\frac{b}{H} = 4.0$	0.385	0.412	0.426	0.431	0.432	0.435		0.4375
									
$\frac{b}{H} \approx \infty$		0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500		0.500

表中的数据反映了装药的利用率随着装药形状的改变按以下规律变化：

(1) 当 $\frac{b}{H}$ 一定，随着 l/b 的增大（装药底面的一边延长），利用率不断提高， $l/b \approx \infty$ （无限延长的直列装药），其利用率达到极限值。

(2) l/b 一定 (l, b 皆为有限值)， $\frac{b}{H}$ 增大（降低装药高度或增大装药宽度），利用率也有所提高。

(3) $b/H \approx \infty$ (l, b 无限大, H 为有限值), 装药利用率的极限值为 0.5。

1.2.3.3 几点结论

根据上述的有关规律, 得出以下结论:

- (1) 接触爆破时, 矩形截面的直列药装优于集团装药;
- (2) 任何几何形状的装药, 其装药高度都不应大于装药底面的最小尺寸;
- (3) 不论如何改变装药形状, 装药的最大利用率都不超过 0.5。

1.2.4 装药形状对爆炸荷载的影响

不同形状的装药, 与目标的接触面积不同; 接触面积的大小影响爆炸产物对目标的作用压力和作用时间。也就是说, 影响爆炸作用冲量。

装药形状对爆炸作用冲量的影响用装药形状系数 μ 表示。

装药形状系数 μ 根据装药的几何尺寸计算。

1.2.4.1 装药形状系数的计算

(1) 平行六面体 (长为 l , 宽为 b , 高为 H , 且 $l > b$) 的装药形状系数, 其计算公式具有普遍意义。它根据装药的宽度和高度, 区分 $b/H < 2$ 和 $b/H \geq 2$ 两种情况, 应用下式计算:

$$\mu = \begin{cases} \frac{b^2}{4lH} \left(3 \frac{l}{b} - 1 \right) & \frac{b}{H} < 2 \\ 3 - 3 \frac{H}{b} - 3 \frac{H}{l} + 4 \frac{H^2}{lb^2} & \frac{b}{H} \geq 2 \end{cases} \quad (1.5A)$$

$$(1.5B)$$

式中: μ ——装药形状系数; b ——装药直径或宽度, m; H ——装药高, m; l ——装药长度, m。

根据公式 (1.5) 可进一步推导出集团装药和矩形截面直列装药的装药形状系数的计算公式。

(2) 对于直径为 b 、高为 H 的直立圆柱体和底面为正方形 (边长 $b \times b$)、高为 H 的集团装药来说, 其底面长与宽相同, 即 $l = b$ 。在公式 (1.5) 中, 以 b 代替 l 并简化后, 即得出集团装药的装药形状计算公式:

$$\mu = \begin{cases} \frac{b}{2H} & \frac{b}{H} < 2 \\ 3 - 6 \frac{H}{b} + 4 \left(\frac{H}{b} \right)^2 & \frac{b}{H} \geq 2 \end{cases} \quad (1.6A)$$

$$(1.6B)$$

(3) 当平行六面体装药的截面为矩形、装药的长度大大超过宽度 ($l \gg b$) 时, 公式 (1.5) 中的 $\frac{H}{l}$ 、 $\frac{H^2}{lb}$ 、 $\frac{b^2}{lH}$ 趋于 0, 即可导出矩形截面直列装药的装药形状系数 (μ_y) 的计算公式:

$$\mu_y = \begin{cases} \frac{3b}{4H} & \frac{b}{H} < 2 \\ 3 \left(1 - \frac{H}{b} \right) & \frac{b}{H} \geq 2 \end{cases} \quad (1.7A)$$

$$(1.7B)$$

1.2.4.2 装药形状系数随 b/H 变化的规律及其意义

根据公式 (1.6)、(1.7) 计算的数据 (表 1.2) 和绘出的曲线 (图 1.4), 可以得出装药形状系数 μ 随 b/H 的变化规律。

表 1.2 装药形状系数 μ 随 b/H 的变化

b/H		$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{2}$	1	2	3	4	5	7.5	10		∞
μ	直立圆柱体和 $b \times b \times H$ 集团装药	0.05	0.1	0.25	0.5	1.0	1.45	1.75	1.95	2.27	2.44		3
	矩形截面直列装药	0.075	0.15	0.375	0.75	1.5	2.0	2.25	2.4	2.6	2.7		3

(1) $\frac{b}{H}$ 相同, 直列装药的 μ 值比集团装药的 μ 值大。

(2) 不论集团装药, 还是直列装药, μ 值都随 b/H 的增大而增加, 这与装药利用率随 b/H 的增大而提高是一致的。

(3) μ 值随 b/H 的变化不均匀。 $b/H < 4$, μ 值增加很快; $b/H > 4$ 以后, μ 值的增加越来越缓慢; $b/H \rightarrow \infty$, μ 值接近极限值 3.0。

需要指出的是, 装药形状既影响作用在目标上的总冲量, 又影响单位冲量。从增加总冲量来说, 应使 b/H 尽量增大。但是, b/H 越大, 装药越宽, 越薄。虽然总冲量增大, 而单位冲量却明显减小。当 b/H 过大时, 由于单位冲量很小, 反而不能破坏目标。因此, 在确定装药形状时, b/H 应该适当。

由于理论计算具有一定的近似性, 目前尚不能精确地确定 b/H 的最优值。且因受现有制式药块几何尺寸的限制, 还难以完全做到按尺寸要求将装药捆包成需要的形状。但是, 理论和实践都表明, 在面接触的条件下, 对于集团装药和矩形截面的直列装药, b/H 的最优值在 2~4 范围内; 在此范围内确定 b/H 的具体值, 基本能够满足爆破工程的要求。

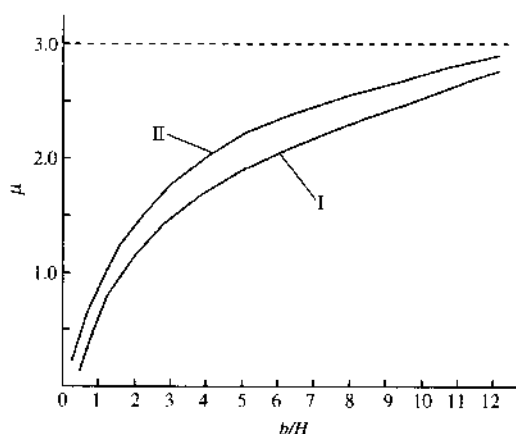


图 1.4 装药形状系数 μ 与 b/H 的关系曲线

I—集团装药; II—直列装药

1.3 爆炸冲量计算

装药接触目标爆破, 爆炸产物作用时间极短, 所以对目标的作用是爆炸冲量的作用^①。

接触爆破是三维空间中的动力破坏, 其中包含一系列的复杂问题。如装药在爆轰过程中, 产物侧向膨胀引起的稀疏波在爆轰产物中的传播; 爆炸冲量在接触面及周围的不均匀分布; 在爆炸冲量作用下, 目标发生的变形对冲量分布的影响; 飞散的爆炸产物同空气介质的作用等。如果考虑上述因素, 问题就变得相当复杂, 不能得到明确的解析解。从解决实际工程问题出发, 不少学者对接触爆炸的冲量计算进行了理论研究。原苏联学者 T.M.

① Proceedings of the 2nd World Congress on Non-Metallic Minerals, Beijing, 1989.

萨拉马辛根据瞬时爆轰理论和平行散射原理对各种装药形状的爆炸冲量提出了理论计算公式；Φ.А. 鲍姆和 К.П. 斯达祖柯维奇应用并发展了 О.Е. 弗拉索夫和 Г.И. 帕柯洛夫的有效药理论，在一维问题的基础上作了进一步研究，提出了圆柱体集团装药爆炸冲量的理论计算公式。上述两种理论计算都较简便，具有实用意义。

1.3.1 萨拉马辛提出的爆炸冲量计算公式

1.3.1.1 基本假设

(1) 装药瞬时爆轰。由于炸药的爆速很高，爆轰完成的时间极短，近似认为炸药的爆速 $D \rightarrow \infty$ ，爆轰完成时间过程 $t \rightarrow 0$ 。这样，一定体积的装药瞬时变成了同体积的爆轰产物，其密度和外形与爆炸前完全相同；产物内部压力均匀；爆轰完成瞬间产物沿原装药自由表面的法线方向同时向外散射。

(2) 产物理想散射。由于空气的密度很小，可忽略不计，认为爆炸产物的散射如同在真空一样。

(3) 物体壁面为绝对刚壁。爆炸产物从产生到飞散完毕，壁面仅获得冲量，质点仅具有一定的初速，还来不及运动。因此，在产物作用时间内，壁面不发生变形。

由于上述假设，就忽略了起爆位置的影响、空气介质对产物飞散的影响和侧向膨胀而引起的稀疏波对爆轰过程的影响；产物的作用仅局限在装药的下方，而在周围无冲量作用；在产物作用时间内，冲量分布不发生变化，从而问题得到简化。

1.3.1.2 比冲量

(1) 圆柱体装药的比冲量。设圆柱体装药直径为 b ，高为 H ，装药密度为 ρ_0 ，直立于目标表面爆炸。因爆炸冲量与装药的几何尺寸紧密相关，现分 $b \geq 2H$ 和 $b < 2H$ 两种情况，分别讨论。

A. 当 $b \geq 2H$ 时，如图 1.5a 所示， $ABEF$ 是圆柱体集团装药通过中心线的剖面。根据基本假设，装药瞬时爆轰后，密度为 ρ_0 的装药瞬间变成了密度为 ρ_0 的爆轰产物。它在向上、向侧外方向同时以散射速度 u_0 飞散，同一时间内散射同等的厚度。所以，装药相邻的自由表面之间，任意时刻的飞散情况可用 45° 方向的交线 AC 、 FD 描述。当产物散射面向下移动的距离为 H 时，产物全部飞散完毕。因此，在装药与壁面之间的接触部位，

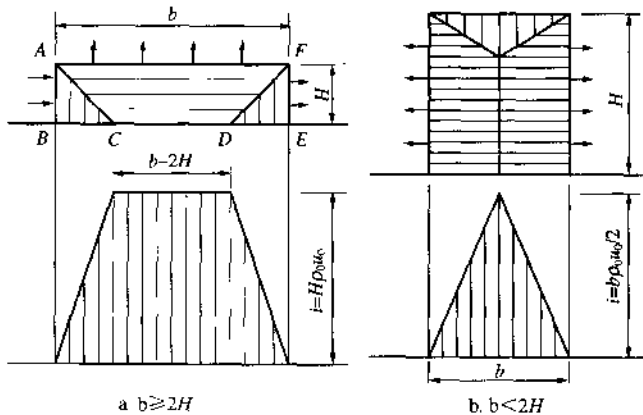


图 1.5 圆柱体装药接触爆破时的比冲量分布

只有中间部分（以 CD 为直径）在产物飞散的全部时间内受到了爆轰产物压力 p_0 的作用。在该部分的各点上，比冲量 i 等于爆轰产物的压力 p_0 与作用时间 τ 的乘积，即：

$$i = p_0 \tau$$

产物对目标上某点的作用时间 τ 等于从该点到装药表面最短的距离除以散射面的移动速度 ω_0 ，对于 C 、 D 之间的各点，其作用时间为：

$$\tau = H/\omega_0$$

根据动量守恒定律，单位时间内的力的冲量（ $p_0 \cdot l$ ）等于该时间内动量的增量（ $\Delta m u_0 = \rho_0 \omega_0 u_0$ ）所以：

$$p_0 = \Delta m u_0 = \rho_0 \omega_0 u_0$$

$$\text{因此， } i = p_0 \tau = \rho_0 \omega_0 u_0 \frac{H}{\omega_0} = H \rho_0 u_0$$

在装药与壁面接触的其余部分，爆轰产物的作用时间由里向外按线性规律缩短。相应地，比冲量的分布图似足以下底直径为 b 、上底直径为 $b - 2H$ 、高为 $i = H \rho_0 u_0$ 的圆台。

B. 当 $b < 2H$ 时：如图 1.6b 所示。当散射面侧向移动距离为 $b/2$ 时，产物飞散完毕。所以，在接触面的中心，产物作用时间最长，比冲量最大。并且：

$$\tau = b/2\omega_0$$

$$i = \frac{b}{2} \rho_0 u_0$$

由接触面中心向外，比冲量按线性规律减小，接触面的外边缘比冲量为 0。

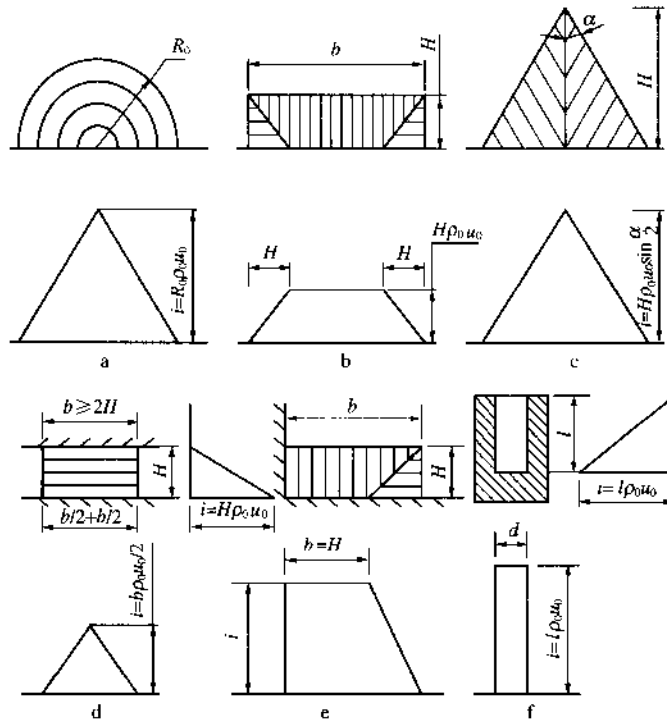


图 1.6 几种装药的比冲量分布

所以, $b < 2H$ 的圆柱体集团装药的比冲量分布图似是以底面直径为 b 、高为 $i = \frac{b}{2} \rho_0 u_0$ 的圆锥。

(2) 其他装药形状的比冲量

A. 半球形装药: 散射面的移动距离为 $x = R_0$; $\tau = R_0/\omega_0$; 比冲量分布图是以 $2R_0$ 为底面直径、高为 $i = R_0 \rho_0 u_0$ 的圆锥 (图 1.6a)。

B. 扁平装药 ($H \ll b$): $x = H$, $\tau = H/\omega_0$, 比冲量分布图是以接触面为底面、高为 $i = H \rho_0 u_0$ 的棱台或圆台 (图 1.6b)。

C. 三角形截面 (高为 H , 顶角为 α) 的直列装药: $x = H \sin \frac{\alpha}{2}$, $\tau = H \sin \frac{\alpha}{2} \omega_0$, 在接触面上的冲量分布图是以 $2H \tan \frac{\alpha}{2}$ 为底边、高为 $i = H \rho_0 u_0 \sin \frac{\alpha}{2}$ 的三角形 (图 1.6c)。

D. 置于平行面之间的集团装药 ($b \geq 2H$): 两个壁面上的比冲量分布相同, 上下对称; $x = \frac{b}{2}$, $\tau = b/2\omega_0$, 比冲量分布图都是以 b 为直径 (或边长)、高为 $i = \frac{b}{2} \rho_0 u_0$ 的圆锥或棱锥 (图 1.6d)。

E. 置于垂直壁面拐角处的立方体集团装药 ($b \geq 2H$): $x = H$, $\tau = H/\omega_0$, 最大比冲量 $i = H \rho_0 u_0$ 。两个壁面上都受到冲量作用, 但比冲量分布不同。水平壁面上的比冲量分布图是以 b 为下底、 $b-H$ 为上底、高为 $i = H \rho_0 u_0$ 的棱台; 垂直壁面上的比冲量分布图是以 H 为底面边长、高为 $i = H \rho_0 u_0$ 的棱锥 (图 1.6e)。

F. 壁厚有底圆筒的装药 (长 l 、直径 d): 产物仅从孔口方向飞散, 筒的内壁和底部都受到冲量作用。散射距离 $x = l$, $\tau = l/\omega_0$, 最大比冲量 $i = l \rho_0 u_0$ 。圆形壁面上的比冲量分布剖面图是边长为 l 、高为 $i = l \rho_0 u_0$ 的三角形; 底部的冲量分布均匀, 是以 d 为直径、高为 $i = l \rho_0 u_0$ 的圆柱 (图 1.6f)。

1.3.1.3 总冲量

接触爆破时, 作用在目标上的总冲量等于比冲量的面积分, 即

$$I = \int i ds$$

也就是比冲量分布图的体积^①。

(1) 圆柱体装药的总冲量

A. 当 $b \geq 2H$ 时: 圆柱体装药作用在壁面上的总冲量等于以下底直径为 b 、上底直径为 $b-2H$ 、高为 $i = H \rho_0 u_0$ 的圆台的体积 (图 1.7)。

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{3} \frac{\pi}{4} b^2 \left(i + \frac{b-2H}{2H} i \right) - \frac{1}{3} \frac{\pi}{4} (b-2H)^2 \frac{b-2H}{2H} i \\ &= \frac{\pi}{12} i \left[b^2 + \frac{b^3 - b^2 2H}{2H} - \frac{b^3 - 6b^2 H + 12bH^2 - 8H^3}{2H} \right] \\ &= \frac{\pi}{12} H \rho_0 u_0 (3b^2 - 6Hb + 4H^2) \end{aligned}$$

B. 当 $b < 2H$ 时: 圆柱体装药作用在壁面上的总冲量等于底面以 b 为直径、高为 $i =$

① 沈贤玑。固体介质中爆炸理论基础 (下册)。中国人民解放军工程兵工程学院, 1981 年 9 月。