

# 地下防护工程与结构

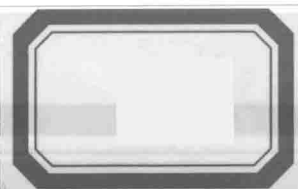
Underground Protective Engineering and Structure

主编◎周子龙 李夕兵 洪亮

Underground  
Protective  
Engineering



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn



# 地下防护工程与结构

Underground Protective Engineering and Structure

主编 ©周子龙 李夕兵 洪亮



中南大学出版社

[www.csupress.com.cn](http://www.csupress.com.cn)

---

### 图书在版编目(CIP)数据

地下防护工程与结构/周子龙,李夕兵,洪亮主编.

—长沙:中南大学出版社,2014.9

ISBN 978-7-5487-1050-9

I.地... II.①周...②李...③洪... III.地下防护工程-  
防护结构 IV.E118

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第043795号

---

## 地下防护工程与结构

周子龙 李夕兵 洪亮 主编

---

责任编辑 秦瑞卿 陈海波

责任印制 易建国

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙市宏发印刷有限公司

---

开 本 787×1092 1/16 印张 14 字数 343千字

版 次 2014年9月第1版 2014年9月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5487-1050-9

定 价 30.00元

---

图书出现印装问题,请与经销商调换

# 前 言

---

---

不管偶然或必然，战争贯穿于人类历史的每个时期。我们都希望和平，但却无法拒绝战争。今天的中国，虽处于和平发展时期，但也面临着许多诱发战争的因素：一方面，国际局势异常复杂，西方大国亡我之心不死；另一方面，周边矛盾从未消失，南沙争端没有缓和，钓鱼岛和东海问题更是持续升级。一旦发生战争，将大量需求地下防护工事。

长期以来，地下防护工程方面的研究和教学多集中在军事院校。近年来，地下工程蓬勃发展，非军事院校的城市地下空间工程专业应运而生，地下防护工程作为地下空间工程的一个重要专业方向，受到越来越多的学生喜爱，但在教学科研上还比较薄弱，合适的教材十分缺乏。

本书在借鉴大量文献的基础上，系统地介绍了地下防护工程与结构的种类，面临的武器破坏效应及动力学成因，防护结构动力分析理论与设计方法，基于现代数值仿真技术的结构动力分析，以及地下工程的特殊防护等，较好地反映了当前地下防护工程与结构领域的技术水平。

本书由周子龙、李夕兵、洪亮主编，参与编写的人员还有李启月、罗从双、江益辉、李国楠、邹洋、吴志波、宁树理、郭民等，在此对他们的付出表示感谢。

本书可作为高等院校相关专业的教学用书，也可供从事人防、国防、市政等地下工程行业的科研、设计和施工人员借鉴参考。

由于编者水平有限，错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者  
2014年8

## 目 录

第1章 绪 论 .....	(1)
1.1 地下防护工程与结构 .....	(1)
1.2 人类战争及武器的演进 .....	(1)
1.3 常规武器及其破坏效应 .....	(2)
1.3.1 常规武器分类 .....	(2)
1.3.2 常规武器的破坏效应 .....	(3)
1.4 核武器及其破坏效应 .....	(6)
1.4.1 核武器及其分类 .....	(6)
1.4.2 核武器破坏效应 .....	(7)
1.5 核爆、化爆与爆炸相似律 .....	(10)
1.5.1 核爆与化爆 .....	(10)
1.5.2 爆炸相似律 .....	(11)
1.6 生化武器及其破坏效应 .....	(14)
1.7 防护工程与结构的等级 .....	(14)
1.7.1 防护工程的分类 .....	(14)
1.7.2 防护工程的等级 .....	(15)
1.8 常见的地下防护结构类型 .....	(15)
1.8.1 单建掘开式结构 .....	(16)
1.8.2 附建掘开式结构 .....	(16)
1.8.3 成层式结构 .....	(17)
1.8.4 坑道式结构 .....	(18)
1.8.5 地(隧)道式结构 .....	(18)
1.8.6 深埋高抗力结构 .....	(19)
1.8.7 野战阵地结构 .....	(19)
1.8.8 特殊工程结构 .....	(20)
第2章 地下防护工程中的应力波问题 .....	(21)
2.1 弹性波基础 .....	(21)
2.1.1 扰动与波 .....	(21)
2.1.2 波的基本概念 .....	(23)
2.1.3 无限长杆中的一维平面波 .....	(23)

2.1.4	一维弹性波在不同介质界面上的反射与透射	(25)
2.2	空气冲击波	(28)
2.2.1	空气冲击波基本特性	(28)
2.2.2	核爆炸地面冲击波参数	(30)
2.2.3	常规武器爆炸空气冲击波	(33)
2.2.4	空气冲击波在小尺寸障碍物上的环流	(33)
2.2.5	空气冲击波在通道中的传播	(36)
2.3	岩土中的应力波	(38)
2.3.1	固体中的波	(38)
2.3.2	应力波在岩土介质自由面引起的层裂	(41)
2.3.3	应力波在层状介质中的传播	(43)
2.3.4	炸药在岩土介质中的爆炸	(44)
2.3.5	岩土介质中的应力波参数	(47)
2.5	水中爆炸与冲击波	(53)
2.5.1	水中爆炸基本现象	(53)
2.5.2	水中冲击波	(55)
2.5.3	水中爆炸相似律	(60)
<b>第3章</b>	<b>地下防护结构动力分析</b>	<b>(63)</b>
3.1	概述	(63)
3.1.1	空气冲击波荷载下的结构动力响应	(63)
3.1.2	地下防护结构承受的常见载荷	(64)
3.1.3	结构动力分析的基本原理	(65)
3.1.4	振动的自由度及其简化	(66)
3.1.5	结构的抗力	(68)
3.1.6	动力系数	(71)
3.2	单自由度集中质量体系的动力分析	(72)
3.2.1	无阻尼弹性体系的自振频率与振型	(72)
3.2.2	无阻尼弹性体系的强迫振动	(73)
3.2.3	阻尼对弹性体系振动的影响	(77)
3.2.4	弹塑性体系的强迫振动	(79)
3.3	分布质量构件按等效体系的动力分析	(81)
3.3.1	等效体系	(81)
3.3.2	等效体系的动力分析	(84)
3.3.3	简单框架按等效体系分析	(85)
3.3.4	等效体系方法的讨论	(88)
3.4	图表法	(92)
3.4.1	理想弹性体系	(92)
3.4.2	理想弹塑性体系	(93)

3.4.3	几种载荷曲线与抗力曲线的简化和分解	(95)
3.5	等效静载法	(98)
3.5.1	等效静载	(98)
3.5.2	自振频率的确定方法	(99)
3.5.3	几种结构的自振频率图表	(100)
<b>第4章</b>	<b>工程材料和构件的动力性能</b>	<b>(104)</b>
4.1	岩土材料的动力特性	(104)
4.1.1	岩石及其动力特性	(104)
4.1.2	非饱和土及其动力特性	(105)
4.1.3	饱和土(三相土)及其动力特性	(106)
4.2	建筑材料的动力性能	(107)
4.2.1	钢材	(107)
4.2.2	混凝土	(108)
4.2.3	其他建筑材料	(110)
4.3	结构构件的动力性能	(110)
4.3.1	钢筋混凝土受弯构件的动力性能	(110)
4.3.2	钢筋混凝土受压构件的动力性能	(116)
4.3.3	钢构件的动力性能	(117)
4.3.4	钢筋混凝土叠合板的动力性能	(119)
<b>第5章</b>	<b>地下防护结构设计的一般要求与步骤</b>	<b>(122)</b>
5.1	地下防护结构设计的特点	(122)
5.2	地下防护结构设计的极限状态	(123)
5.3	地下防护结构设计的一般规定	(124)
5.4	地下防护结构设计的一般步骤	(125)
<b>第6章</b>	<b>防空地下室动力计算与设计</b>	<b>(127)</b>
6.1	防空地下室结构的荷载	(127)
6.1.1	静荷载	(127)
6.1.2	动静荷载组合	(127)
6.1.3	防空地下室结构的核爆炸等效静载	(131)
6.1.4	防空地下室结构的常规武器爆炸等效静载	(140)
6.2	结构内力分析与截面设计	(148)
6.3	防护门、门框墙等口部结构设计	(152)
6.3.1	防护门设计	(152)
6.3.2	门框墙设计	(156)
6.3.3	其他口部构件设计	(160)

第7章 数值方法在动力分析中的应用 .....	(164)
7.1 数值模拟技术 .....	(164)
7.1.1 有限元法 .....	(164)
7.1.2 有限差分法 .....	(164)
7.1.3 离散元法 .....	(165)
7.2 PFC 程序介绍 .....	(165)
7.2.1 PFC 简介 .....	(165)
7.2.2 PFC 程序求解步骤 .....	(167)
7.2.3 颗粒流模型的基本假定 .....	(168)
7.2.4 颗粒流计算的基本思路 .....	(169)
7.2.5 颗粒流方法的特点 .....	(169)
7.3 PFC 程序的基本理论 .....	(170)
7.3.1 力-位移法则 .....	(170)
7.3.2 运动法则 .....	(172)
7.3.3 边界和初始条件 .....	(173)
7.4 运动与阻尼 .....	(173)
7.4.1 局部阻尼 .....	(174)
7.4.2 组合阻尼 .....	(174)
7.4.3 黏滞阻尼 .....	(175)
7.5 接触本构模型 .....	(175)
7.5.1 接触刚度模型 .....	(176)
7.5.2 滑动模型 .....	(177)
7.5.3 黏结模型 .....	(177)
7.6 PFC 在动态分析中的应用 .....	(180)
7.6.1 波在颗粒中的传播 .....	(180)
7.6.2 架柱结构在地震作用下的破坏 .....	(184)
7.6.3 岩石材料在冲击荷载下的破坏 .....	(187)
第8章 地下工程的特殊防护 .....	(192)
8.1 辐射类防护 .....	(192)
8.1.1 光辐射 .....	(192)
8.1.2 早期核辐射 .....	(192)
8.1.3 辐射类防护要点 .....	(196)
8.2 污染类防护 .....	(200)
8.2.1 化学武器 .....	(200)
8.2.2 生物武器 .....	(201)
8.2.3 放射性沾染 .....	(202)
8.2.4 污染类防护要点 .....	(202)



8.3 电磁脉冲类防护 ..... (206)

    8.3.1 核电磁脉冲 ..... (206)

    8.3.2 电磁脉冲弹 ..... (209)

    8.3.3 电磁脉冲类防护 ..... (209)

参考文献 ..... (212)

# 第1章 绪论

## 1.1 地下防护工程与结构

防护工程是一类比较特殊、具有预定防护功能的工程构筑物，是防护建筑与结构，以及为保证完成工程所担负的战时职能的辅助系统（如通风空调、给排水、发供电、防毒、防辐射、防电磁脉冲、工程伪装及隔震等系统）的总称。通常，防护工程应能抵抗预定武器的杀伤破坏作用。

防护结构是指能够抵抗预定杀伤破坏作用的工程结构，这是比较狭义的概念。在广义上，防护结构还泛指可能受到偶然性冲击和爆炸作用的结构物，通常包括工程结构和防护设备与设施（防护门、防护密闭门、消波系统等）。由于地下工程防护效能要优于地面建筑，因此防护工程一般建于地下或半地下，此时防护工程与结构又称为地下防护工程与结构。

## 1.2 人类战争及武器的演进

据不完全统计，在地球上出现人类文明的 5500 年中，发生了 15000 多次战争和武装冲突，有几十亿人因此丧生。战争如此频繁，平均每 100 年内只有不到一个星期的和平生活。即使文明高度发达的现代社会，世界上仍有三分之一的国家处于战争状态。

战争所使用的武器不断发展，每代战争表现出不同的特点。

**第一代战争：**在人类原始社会结束后持续 3500 年之久，战争武器主要以人力、畜力或简单机械为动力，以地面作战为主，是冷兵器、铠甲，接触性徒手格斗，步兵、骑兵分队和部队的战争。战争的主要目的是消灭敌人，夺取其武器和财产。

**第二代战争：**这一时代自 9 世纪末中国发明了火药以后，持续了约 600 余年。出现了以火药为驱动材料的作战工具，是火药、滑膛枪炮武器，步兵分队、部队及兵团接触性沟壕式战争，海军在近海区域展开作战行动。战争的主要目的是消灭敌人，夺取其领土和财产。

**第三代战争：**16 世纪以枪膛和炮膛中开始有了膛线为标志，大约持续了 200 余年。主要为射程、精度及射速都大幅度提高了的多种装药线膛武器，在一定距离上的诸兵种合作兵团、军团的堑壕和散兵壕式战争，或在海洋上展开作战行动。战争的主要目的是粉碎敌人的武装力量，摧毁其经济和推翻其政权。

**第四代战争：**开始于 19 世纪末至 20 世纪初，以大量机械化军事武器的物质较量为胜败关键。自动武器、火箭武器、陆军、坦克、空军、舰队、运输工具及通信工具发达，是在一定距离上的陆地堑壕式接触战争，是对军队进行空中打击和在海洋上展开的战争。战争的主要目的是粉碎敌人的武装力量，摧毁其经济潜力和推翻其政权。

**第五代战争：**第二次世界大战末，核能、电子计算机技术应用于军事，出现核战争时代，

核武器及核生化武器成为时代特点。但是，除了1945年美国对日本两座大城市实施的核弹轰炸外，核战争没再发生过。核武器在某种程度上主要起到战略威慑作用。

第六代战争：随着计算机、人工智能、通信技术的高度发展，主要依靠不同作战平台发射的常规高精度突击武器和防御武器、新物理原理武器、信息武器、电子对抗兵力武器，战争的主要目的是在任何距离上以非接触方式粉碎任何国家的军事、经济潜力。

对于地下防护工程与结构来说，面临的主要威胁主要是常规武器、核武器、生化武器以及其他偶然性冲击爆炸作用。

## 1.3 常规武器及其破坏效应

### 1.3.1 常规武器分类

#### 1. 发射方式

按照发射方式不同，常规武器有：

- (1) 轻武器，如步枪、轻重机枪和火箭筒等发射的枪弹等。
- (2) 火炮炮弹，如加农炮、榴弹炮、迫击炮、无后坐力炮发射的各种炮弹。
- (3) 飞机投掷的各种航(炸)弹。
- (4) 常规弹头的导弹。

炮弹是一种内有负载的投射物，与枪械使用的子弹不同。炮弹内有炸药或其他装药。炮弹通常是大尺码尖头圆柱形物体，外形合乎空气动力学的要求，由炮兵的火炮或是搭载于装甲车辆、战车或是军舰上的火炮发射。由于炮弹的口径小，装药量也不大，因此炮弹主要对野战阵地工程结构威胁大，对地下防护结构一般不构成威胁。

航弹是指从航空器上投掷的一种爆炸性弹药，俗称炸弹。航弹按其有无制导系统，又可分为普通航弹和制导航弹。而制导航弹就是使航弹脱离飞机后通过自导或它控引导航弹命中目标。随着军事高技术的发展和运用，制导手段越来越多。目前，制导系统有激光制导、电视制导、红外制导、全球定位系统制导(GPS)、惯性制导(INS)、指令制导(无线电指令制导)、毫米波制导、合成孔径雷达制导以及复合制导等，命中精度可达数米，最高可达1 m以内。制导航弹可以在普通航弹上改装加上制导系统。精确制导航弹对于要求抗御常规武器直接命中作用的防护工程构成了严重威胁。从20世纪90年代以来发生的几场高技术局部战争来看，制导航弹已成为战场的主要打击武器。所以，航弹是防护工程需要抵御的主要常规武器之一。

导弹是由战斗部、动力装置和制导系统组成的飞行器。战斗部可以装填核装料、高能炸药、化学毒剂或带细菌的生物体等，其动力装置实际上就是一枚火箭，可将战斗部运送到指定区域。制导系统可将导弹精确引导到预定目标上去。根据战斗部装填物的不同，可将导弹分为常规导弹和核导弹。导弹自第二次世界大战问世以来，受到各国普遍重视，得到很快发展。导弹的使用，使战争的突然性和破坏性增大，规模和范围扩大，进程加快，从而改变了过去常规战争的时空观念，给现代战争的战略战术带来巨大而深远的影响。

另外高技术常规武器在现代战争中的地位和作用不断提高，以其精确打击能力，既能最有效地打击重要目标，又能限制附带毁伤，特别适合于实现有限的战争目的，越来越受到各个国家的重视。精确制导武器的应用，使空袭重要目标由大面积轰炸发展为远距离精确攻

击,提高了武器毁伤效能,因此对防护结构提出了更高的要求。据有关统计,海湾战争期间,美军大约平均2枚精确制导武器就摧毁一个重要目标。多国部队使用的精确制导弹药仅占所投射弹药总量的8%,而摧毁的目标数占被毁目标总数的40%。科索沃战争中,以美国为首的“北约”部队使用了2万多枚炸弹和导弹,其中8000多枚属于精确制导弹药,占全部武器弹药的35%,摧毁的目标数量占“南联盟”被毁目标总数的74%。美军在阿富汗战争使用的1.2万枚炸弹中,有6700多枚是精确制导炸弹,占总数的56%。

此外,常规武器除了命中精度的大幅度提高以外,其侵彻爆炸破坏能力也越来越强。例如,在海湾战争中首次使用的“地堡克星”GBU—28型激光制导钻地弹,可穿透混凝土61 m,穿透坚硬岩石40 m。过去我们认为仅面临核武器等战略武器打击的防护结构,其遭受常规武器精确打击的可能性越来越大。高技术常规武器已成为防护结构面临的最现实的威胁。

## 2. 弹丸破坏效应

按弹丸破坏效应不同,常规武器可分为:

(1) 爆破弹型。这类弹丸主要依靠炸药爆炸产生的冲击波及弹片来破坏杀伤目标,如炮弹中的榴弹、航弹中的普通爆破弹等。

(2) 半穿甲弹型(又称为侵彻爆破弹)。这类弹丸一方面依靠弹丸的冲击动能侵彻目标,另一方面依靠一定装药量的爆炸作用来破坏目标,如炮弹和航弹中的半穿甲弹、混凝土破坏弹、厚壁爆破弹等。

(3) 穿甲弹型。这类弹丸主要依靠弹丸巨大的冲击动能侵彻、贯穿目标,如各种穿甲弹。

(4) 燃料空气弹型(又称为气浪弹或云雾弹)。这类弹丸依靠弹体爆炸后抛洒的内装液体燃料与空气混合形成气化云雾,经二次引爆产生的冲击波来破坏目标和杀伤人员。

(5) 燃烧弹型。这类弹丸主要依靠弹体内的凝固汽油等燃烧剂产生的高温火焰形成大火来破坏目标。

### 1.3.2 常规武器的破坏效应

对防护结构而言,常规武器具有冲击和爆炸作用。从结构响应和破坏形态来看,又可分为局部作用和整体作用。

#### 1. 局部作用

##### 1) 冲击局部作用

在无装药的穿甲弹命中结构或有装药的弹丸命中结构尚未爆炸前,结构仅受冲击作用。具有动能的弹体撞击结构有两种情况:一种情况是弹体动能较小或结构硬度很大,弹体冲击结构仅留下一定的凹坑后被弹开,或者因弹体与结构成一定的角度而产生跳弹,即弹丸未能侵入结构;另一种情况是弹丸冲击结构侵入内部,甚至产生贯穿。

下面以图1.1和图1.2所示的弹丸沿目标法线冲击混凝土结构为例来分析具体的破坏现象。

(1) 目标厚度较大,而命中速度 $v_1$ 不大时,只在目标正表面造成很小的弹痕,弹丸被目标弹回[见图1.1(a)]。

(2) 目标厚度不变,命中速度稍大,即 $v_2 > v_1$ ,弹丸不能侵入混凝土内,但在混凝土表面形成一定大小的漏斗状孔,这个漏斗状孔称为冲击漏斗坑[见图1.1(b)]

(3) 目标厚度不变,命中速度更大时,即 $v_3 > v_2$ ,则在形成冲击漏斗坑的同时,弹丸侵入

目标,排挤周围介质而嵌在一个圆柱形的弹坑内[见图 1.1(c)]。这种破坏现象称为“侵彻”。

(4)目标厚度不变,命中速度再增大,即  $v_4 > v_3$ 。弹丸侵入目标更深[见图 1.1(d)];或者命中速度不变(仍为  $v_3$ ),混凝土的厚度减薄时,结构背面出现裂纹[见图 1.2(d)]。裂纹的宽度和长度随着命中速度或侵彻深度的增大而增大;或者命中速度不变,随目标厚度的减薄而增大。

(5)目标厚度不变,命中速度再增大,即  $v_5 > v_4$ ,弹丸侵彻更深;或者命中速度不变(仍为  $v_3$ ),混凝土结构再减薄时,结构背面将出现部分混凝土碎块的脱落,并以一定速度飞出,这种破坏现象称为“震塌”。当有较多混凝土震塌飞出后,则形成震塌漏斗坑[见图 1.1(e)和图 1.2(e)]。

(6)目标厚度仍不变,命中速度再增加,即  $v_6 > v_5$ ,侵彻更深;或者命中速度不变(仍为  $v_3$ ),结构厚度再减薄时,则出现冲击漏斗坑和震塌漏斗坑连接起来,产生“先侵彻后贯穿”的破坏现象[见图 1.1(f)和图 1.2(f)]。

(7)当目标厚度不变,命中速度足够大时;或者命中速度不变(仍为  $v_3$ ),结构厚度很薄时,弹丸尚未侵入混凝土内,就以很大的力量冲掉一块锥状混凝土块,并穿过结构。这种破坏现象称为“纯贯穿”[见图 1.1(g)和图 1.2(g)]。

从观察单纯冲击引起的破坏情况不难发现,它们的破坏现象都发生在弹着点周围或结构反向临空面弹着投影点周围。这与一般工程结构的破坏现象(如承重结构的变形与破坏等)不同。由于它的破坏仅发生在结构的局部范围,故称其为局部破坏,这里是由冲击作用引起的,因此又称为冲击局部破坏。局部作用与结构的材料性质直接有关(例如,炮、航弹冲击钢筋混凝土产生震塌现象,而冲击木材就可能不出现震塌现象等),而与结构类型(板、刚架、拱形结构等)及支座条件关系不大。

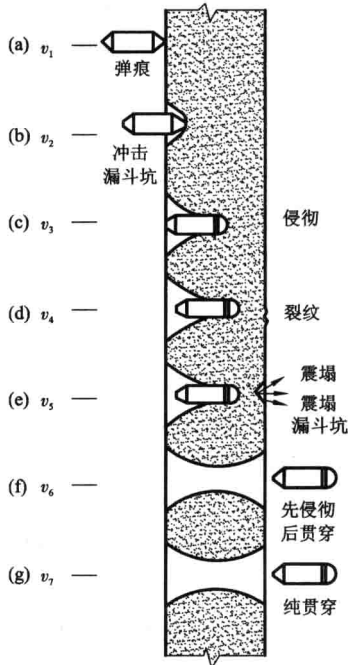


图 1.1 冲击局部破坏现象  
(目标厚度不变,命中速度增大)

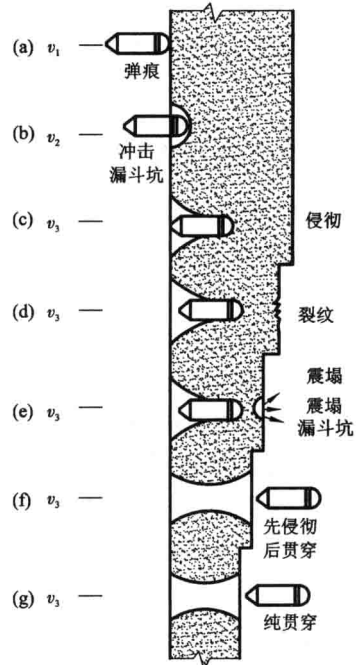


图 1.2 冲击局部破坏现象  
(命中速度不变,目标厚度减薄)

## 2) 爆炸局部作用

弹丸一般都装有炸药, 在冲击作用中或结束时装药爆炸, 进一步破坏结构。

对于爆破弹, 一般不考虑它侵入钢筋混凝土等坚硬材料内部爆炸, 但可以侵入土壤等软介质; 对于半穿甲弹、穿甲弹, 则要考虑它侵入混凝土等坚硬介质中爆炸。这两种爆炸的破坏现象基本差不多, 侵入后爆炸的破坏威力更大些, 这是因为侵入土中或结构介质内部处于堵塞状态的爆炸能量不能有效逸出空中, 从而提高了装药爆炸耦合到介质中的能量分配比例, 所以破坏作用更大。图 1.3 是炸药接触爆炸时混凝土结构的破坏现象。由图可见, 迎爆面混凝土介质被压碎、破裂、飞散而形成可见弹坑(被称为爆炸漏斗坑); 在背爆面, 随着结构厚度的减薄, 开始结构无裂缝, 继而出现裂缝、震塌、震塌漏斗坑, 最后贯穿。由于破坏仅发生在迎爆面爆点和背爆面爆心投影点周围区域并由爆炸产生, 故称为爆炸局部破坏。爆炸和冲击的局部破坏现象十分相似, 都是由于在命中点(冲击点处及爆心处)附近的材料质点获得极高的速度, 使内部介质产生很大的应力破坏, 且破坏都是发生在弹着点及其表面附近区域。

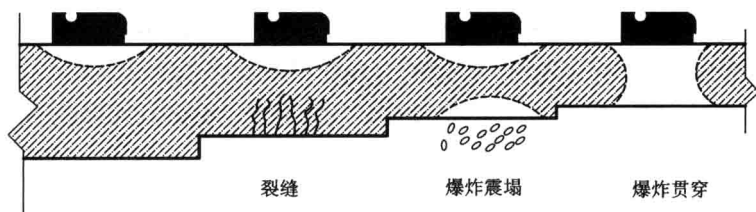


图 1.3 爆炸局部破坏现象

## 2. 整体作用

结构在遭受炮(航)弹等常规武器的冲击与爆炸作用时, 除了上述的开坑、侵彻、震塌和贯穿等局部破坏外, 弹丸冲击、爆炸时还要对结构产生压力作用, 一般称为冲击和爆炸动载。在冲击、爆炸动载作用下, 整个结构都将产生变形和内力, 这种作用就称为整体作用(见图 1.4)。例如, 梁、板将产生弯曲、剪切变形与破坏, 以及柱的压缩及基础的沉陷等。整体破坏作用的特点是使结构整体产生变形和内力, 结构破坏是由于承载力不够或出现过大的变形、裂缝, 甚至造成整个结构的倒塌。破坏点(线)一般发生在产生最大内力的地方。结构的破坏形态与结构的形式和支座条件有密切关系。例如, 等截面简支梁在均布动载作用下最大扭矩发生在梁的中间位置, 如果梁破坏, 那么破坏点应在梁的中部。



图 1.4 炮、航弹命中简支梁时的局部破坏作用和整体破坏作用

常规武器爆炸可以分为三种情况: ①直接接触结构爆炸; ②侵入到结构材料内爆炸; ③距结构一定距离爆炸。前两种情况对结构的破坏一般是以局部作用为主; 而离结构一定距

离爆炸时，结构可能产生局部破坏，也可能同时产生整体破坏，这取决于爆炸的能量、爆炸点与结构的距离以及结构特性等因素。当常规武器落到岩土介质表面并爆炸时，将使下方岩土介质压碎、破裂、飞散而形成可见弹坑；同时在地表形成空气冲击波，在地下介质中产生半球形的压缩波。

在进行地下防护结构设计时，若考虑常规武器直接命中的作用，原则上需同时考虑局部和整体破坏作用，以最危险的情况来设计结构。一般来说，跨度小、构件厚的结构，局部作用起决定作用；反之，跨度大、厚度薄的结构，整体作用常起控制作用。若常规武器非直接命中，则一般只需考虑整体作用。

## 1.4 核武器及其破坏效应

到目前为止，核武器的真正使用只有两次，其中一次是1945年8月6日在日本广岛的核爆炸。实施广岛核爆炸的原子弹命名为“小男孩”，以铀235为裂变材料，弹长3.04 m，弹径0.71 m，重约4.4 t，当量为1.25万 t TNT；核爆炸造成广岛7.1万人死亡，6.8万人受伤；城市40%的面积成为焦土，92%的面积无法辨认原貌。另一次是1945年8月9日的日本长崎核爆炸。该原子弹命名为“胖子”，以钚239为裂变材料，弹长3.25 m，弹径1.52 m，重约4.55 t，当量2.2万 t TNT；爆炸造成长崎市3.6万人死亡，4.2万人受伤；毁坏房屋2万余栋，市区1/3成为废墟。

### 1.4.1 核武器及其分类

利用原子核裂变(原子弹)或聚变(氢弹)反应时释放的巨大能量起杀伤破坏作用的武器称为核武器，其构造如图1.5所示。核武器的威力以“TNT当量”来衡量。例如，“15kt TNT当量”的核武器，是指核武器爆炸可释放出的能量相当于15kt的TNT炸药爆炸时放出的能量。工程上常以千吨(kt)作为核武器当量的质量单位。

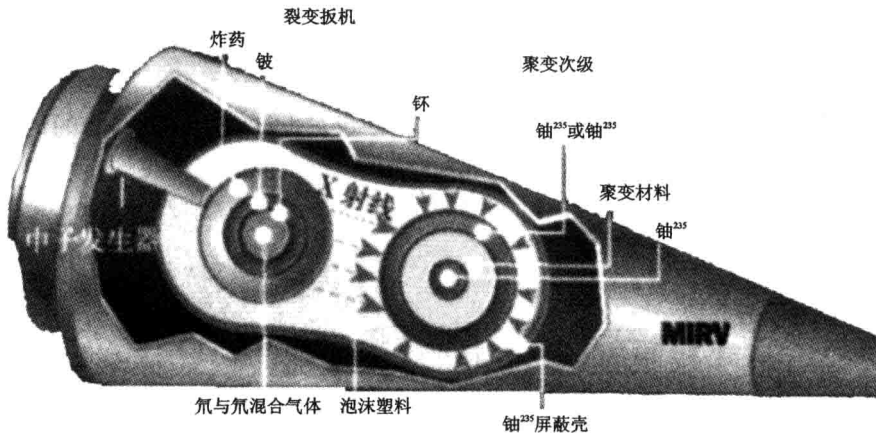


图 1.5 核弹构造示意图

导弹和巡航导弹等)和核航弹;按射程分为洲际核弹(大于8000 km)、远程核弹(4000~8000 km)、中程核弹(1000~4000 km)以及近程核弹(小于1000 km);按功能分为一般核弹、特殊功能核弹以及无剩余辐射弹。其中特殊功能核弹指的是为突出核武器某种效应而去掉其他核武器效应的核弹头,主要有电磁脉冲弹(EMP弹)、冲击波弹(ERR弹)以及增强辐射弹等。

核武器在空气中的爆炸方式有空爆和地爆两种,根据比例爆高 $H_s$ 进行划分。比例爆高定义如下:

$$H_s = H/\sqrt[3]{W} \quad (1.1)$$

式中: $H$ ——爆炸高度(m);

$W$ ——核武器TNT当量(kt)。

空中爆炸是指火球不与地面接触的一种核爆炸,通常 $H_s > 40 \sim 60$  m,几乎不产生弹坑效应。空中爆炸又分为低空爆炸、中空爆炸和高空爆炸。低空爆炸用于破坏较坚固的地面和地下目标,地面放射污染严重。中空爆炸用于破坏不太坚固的地面目标以及浅埋的地下目标,地面放射污染稍轻一些。高空爆炸是在大气层以上的核爆炸,通常 $H_s > 300$  m,由于空气稀薄,使得核爆炸能量主要以光辐射而很少以冲击波的形式出现。因此,高空爆炸对地面及地下工程不致引起破坏,但电磁脉冲是重要的破坏因素。

地面爆炸指火球与地表接触的爆炸。当核弹的端部或边缘与地面直接接触时又称为触地爆炸( $H_s = 0$ )。对于坚固设防地域常采用核武器地面爆炸方式。对于特别重要的防护工程则可能采用触地爆炸方式,因为触地爆炸产生的强烈直接的冲击是摧毁深埋坚固防护工程的有效手段。

地下爆炸( $H_s < 0$ )是核装料在地表以下爆炸,又称为钻地爆。地下爆炸包括两种情况,即近地表(浅层)爆炸和完全封闭式爆炸。随着地下爆炸深度的增加,爆炸的能量越来越多地消耗于形成弹坑和地冲击效应,空气冲击波和辐射效应相应地降低。封闭式地下爆炸则不产生空气冲击波效应。完全封闭式爆炸时火球不冒出地表面。与触地爆炸类似,地下爆炸产生的直接地冲击是摧毁深埋坚固防护工程的有效手段。

## 1.4.2 核武器破坏效应

核武器爆炸后,在爆炸瞬间产生强烈的闪光,继而出现明亮的火球(图1.6)。随后火球上升膨胀,在几秒至十余秒时间内火球逐渐冷却。在此期间还发出不可见的早期核辐射、光辐射及强大的冲击波(图1.7)。上升的火球将地面上的尘埃掀起呈柱状上升,与火球烟云聚合成蘑菇状。烟云内的物质受到强大的早期核辐射作用而产生感生放射现象,这些烟云随风飘散下落,形成放射性尘埃,回落地面后在爆心下风方向的地区形成放射性沾染地段。

### 1. 光(热)辐射

核爆炸时,在反应区内可达几千万摄氏度的高温,瞬即发出强光和热,时间极短,主要是低频紫外线及可见光。闪光过后紧接着形成的明亮火球,其表面温度可达6000℃以上,接近太阳表面的温度。从火球表面辐射出光和红外线,时间为1~3s,光辐射(又称为热辐射)的杀伤破坏作用主要发生在这一阶段。

光辐射能引起人体受照面直接烧伤。若用眼睛直视,会造成眼底烧伤失明的永久性伤害。由于光辐射作用时间很短,人体表面的浅色衣服或建筑物表面涂成浅色时,可减轻直接烧蚀。但由于城市中可燃建筑物密集,将引起严重的城市大火。光辐射对于地下防护结构而



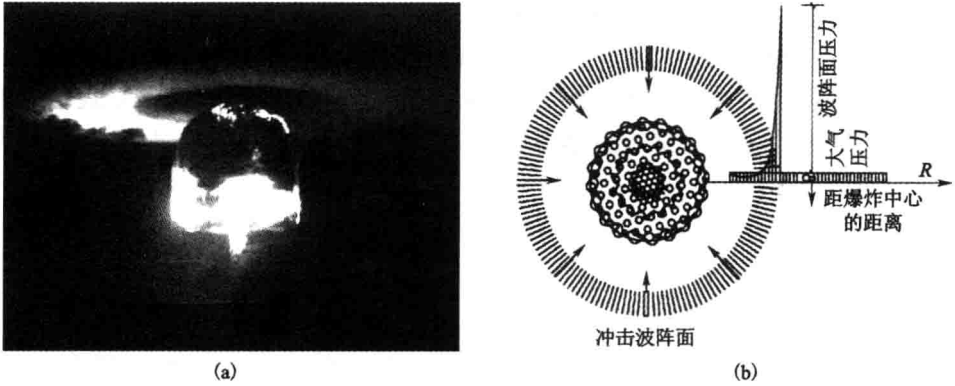


图 1.6 核武器爆炸情形  
(a) 爆炸蘑菇云; (b) 迅速膨胀

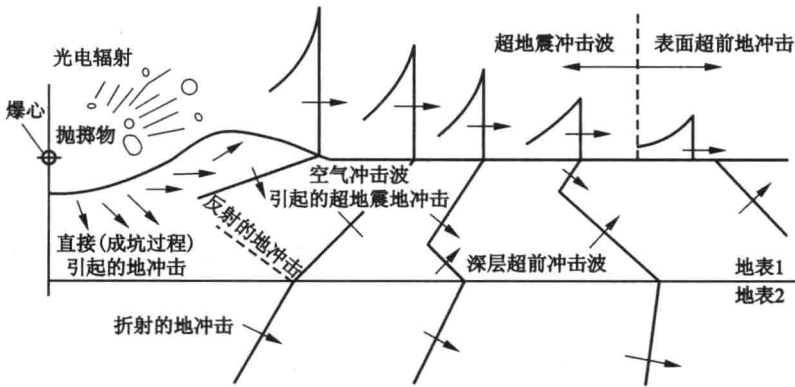


图 1.7 核爆炸的破坏效应

言, 不致构成严重威胁, 只需注意避免易燃部分暴露在外, 对易燃物的暴露部分涂以白涂料或防火涂料, 可有效地减少燃烧的危害。光辐射引起的城市大火会威胁人防工程的安全, 应采取综合防火措施来解决。地下工程具有良好的防火功能, 但应注意出入口的防火、防堵等。

## 2. 空气冲击波

核爆炸时, 核反应在微秒级时间内放出巨大的能量, 在反应区内形成几十亿至几百亿个大气压的高压和几千万摄氏度的高温。高温高压的爆炸产物强烈压缩周围空气, 形成空气冲击波向外传播。空气冲击波的主要特征是在波阵面到达处压力骤然跃升到最大值, 压力沿空间的分布是朝向爆心方向逐渐减小, 并形成负压区。因此, 空气冲击波在大气中的传播包括两种压力状态的传播, 即压缩区和稀疏区(负压区)。

空气冲击波到达空间某位置时, 该处空气质点受到强烈压缩而压力骤然上升。压力超过大气压力的部分称为“超压”。同时, 还使空气质点获得一个很大的速度, 向冲击波的前进方向运动。这种由于空气质点高速运动所产生的压力称为“动压”。动压的作用只有当空气质点运动受阻时才会表现出来。暴露于地面的人体或建筑物等受冲击波作用时, 冲击波的超压