

普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

地下工程爆破

(新1版)

D X G C B P

杨小林 主 编
林从谋 副主编



WUTP

武汉理工大学出版社

普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

地下工程爆破

(新 1 版)

主 编 杨小林

副主编 林从谋



武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

【内 容 提 要】

本书依据土木工程专业人才培养计划中对知识和能力的要求,以突出培养学生的基本理论、基本知识和基本技能为重点,系统地介绍了爆破的基本理论、技术、设计施工和安全管理等内容。其中基础理论部分包括爆炸和炸药的基本理论,冲击波和应力波的基本理论,岩石爆破破坏机理,炸药的爆破作用原理;爆破器材与起爆技术部分包括炸药和起爆器材,起爆方法和起爆技术等;爆破设计及施工技术部分包括隧道与地下工程中的掘进爆破技术,岩土工程中的浅孔、中深孔爆破技术,硐室爆破技术,拆除爆破和特种爆破技术;爆破安全和测试技术部分包括爆破危害和安全技术,爆破事故与防治,爆破测试技术等。

本书可作为土木工程专业隧道与地下工程、岩土工程以及矿山建设工程方向的教材,也可以作为相关学科的参考教材,讲授课时 50~60 学时,亦可供从事设计、科研、施工和管理等相关专业工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程爆破/杨小林主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2009.8

ISBN 978-7-5629-3000-6

I. 地…

II. 杨…

III. 地下工程-爆破技术

IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 147395 号

出版者:武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.techbook.com.cn> 理工图书网

印刷者:武汉理工大印刷厂

发行者:各地新华书店

开 本:880×1230 1/16

印 张:12.5

字 数:405 千字

版 次:2009 年 8 月第 1 版

印 次:2009 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1—3000 册

定 价:22.50 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87397097 87383695

前 言

钻爆法施工由于对地质条件适应性强,开挖成本低,在岩石隧道与地下工程、涵洞、矿山井巷工程的施工中得到了广泛应用。在隧道和地下工程的掘进循环作业中,主要的工序有“破、通、装、运、支”五个环节,爆破是一个先行和主要工序,其他后续工序都要围绕它来安排,爆破的质量和效果都将影响后续工序的效率和质量。掘进爆破的主要任务,是在保证安全的条件下,高速度、高质量地将岩石按规定断面爆破下来,并且尽可能不损坏围岩;爆破后的岩石块度和形成的爆堆,应有利于装载机械发挥效率。因此,掘进爆破是隧道与地下工程建设中非常重要的组成部分。

爆破工程作为隧道与地下工程专业方向的主干课程,以提高学生的综合素质和工程应用能力为目的,主要介绍地下工程爆破的基本理论、应用技术、设计施工和安全管理等内容。本书在贯彻《爆破安全规程》(GB 6722—2003)及相关行业法规等方针、政策、法规、标准的有关要求及规定的基础上,在基础理论方面,重点介绍了炸药理论、岩石爆破机理、爆破器材和起爆技术等方面的基础理论和新进展。基础理论部分是课程的重点,也是难点,需要扎实的物理、化学、数学和力学知识,以及应力波理论、岩石力学和工程地质等基础知识,因此,着重介绍概念和物理实质,力求简明扼要、突出重点。在工程实践方面,基于该课程实用性强的特点,重点介绍了隧道与地下工程以及露天岩土工程中常用的爆破技术和设计方法,使学生能够掌握工程爆破的基本理论、设计和施工技术。本书的另一个主要特点是坚持科学性、先进性和实用性,既有理论分析和试验研究,也有工程实践应用,比较系统地介绍了近年来隧道与地下工程掘进爆破、岩土工程爆破、特种爆破中的现代爆破理论和技术的研究成果,提供了一些实例及设计方法,力求使学生能够对工程爆破的现状与进展有一个比较全面的了解。

本书共分9章,其中第1、5、6章,以及第2.4、3.6节由洛阳理工学院杨小林教授编写,第2、3、4章(除2.4、3.6节外)由华侨大学林从谋教授编写,第7、8、9章由河南理工大学余永强博士编写,最后由杨小林教授负责统稿。其中第3.6、4.3、5.4、6.7和9.6节的内容主要体现了现代爆破器材、爆破理论和工程爆破技术的最新成果和发展趋势,已经超出了大纲的要求,可以作为选讲和自学内容;而第8章的内容已经超出了岩土介质爆破的范围,可以根据学时数,安排部分讲解或者作为自学的内容。

由于岩土力学性质和地下工程地质条件的复杂性,以及对炸药爆炸作用产生压力计算的不准确性等因素,使得对于岩石爆破理论的研究尚不十分成熟,爆破设计计算还不能精确完成,目前还是以采用经验和工程类比方法为主。因此,在教材编写的系统性、全面性,以及对参考资料的选择及理解等方面,可能还不十分完善和准确。加上我们水平有限,时间仓促,错漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2009年6月

目 录

1 概论	(1)
1.1 爆破工程的应用与发展	(1)
1.1.1 爆破器材及其发展	(1)
1.1.2 工程爆破技术及其应用	(2)
1.1.3 隧道与地下工程掘进爆破技术	(2)
1.1.4 土石方露天爆破技术	(3)
1.1.5 拆除爆破技术	(3)
1.2 爆破方法的特点及分类	(3)
1.3 爆破工程的安全性	(5)
2 炸药的爆炸性能及其参数	(6)
2.1 炸药及爆炸的基本概念	(6)
2.1.1 爆炸及其分类	(6)
2.1.2 产生化学爆炸的条件	(6)
2.1.3 炸药化学变化的基本形式	(8)
2.2 炸药的爆炸反应及其热化学参数	(9)
2.2.1 氧平衡	(9)
2.2.2 炸药爆炸反应方程式与爆炸产物	(11)
2.2.3 爆热	(12)
2.2.4 爆容	(14)
2.2.5 爆温	(15)
2.2.6 爆压	(16)
2.3 炸药的起爆和感度	(16)
2.3.1 炸药的起爆	(16)
2.3.2 炸药的感度	(17)
2.4 炸药的爆炸理论	(19)
2.4.1 波的概念和基本方程	(19)
2.4.2 冲击波	(21)
2.4.3 炸药的爆炸过程	(22)
2.5 炸药的爆炸作用及其性能	(25)
2.5.1 炸药的爆力	(25)
2.5.2 炸药的猛度	(26)
2.5.3 炸药的爆速及影响因素	(27)
2.5.4 炸药的殉爆	(29)
2.5.5 炸药的聚能效应	(30)
思考题	(30)
3 工业炸药	(31)
3.1 工业炸药的分类	(31)
3.1.1 按应用范围和成分分类	(31)
3.1.2 按使用条件分类	(32)

3.1.3 按主要化学成分分类	(32)
3.2 工业猛炸药和硝化甘油炸药	(32)
3.2.1 工业常用猛炸药	(32)
3.2.2 硝化甘油炸药	(33)
3.3 铵梯炸药、铵油炸药和铵松蜡炸药	(35)
3.3.1 铵梯炸药	(35)
3.3.2 铵油炸药	(37)
3.3.3 铵松蜡炸药	(38)
3.4 浆状炸药、水胶炸药和乳化炸药	(38)
3.4.1 浆状炸药	(38)
3.4.2 水胶炸药	(39)
3.4.3 乳化炸药	(40)
3.5 煤矿许用炸药	(41)
3.5.1 煤矿许用炸药的要求	(41)
3.5.2 煤矿许用炸药的品种、分级与检验方法	(42)
3.6 乳化炸药现场混装技术	(43)
3.6.1 现场混装炸药技术的发展	(43)
3.6.2 现场混装乳化炸药的技术先进性	(43)
3.6.3 乳化炸药现场混装技术与设备	(44)
思考题	(45)
4 起爆器材和起爆技术	(46)
4.1 火雷管和电雷管	(46)
4.1.1 火雷管	(46)
4.1.2 电雷管	(47)
4.1.3 导火索	(50)
4.2 导爆管和导爆管雷管	(51)
4.2.1 导爆管	(51)
4.2.2 导爆管雷管	(51)
4.3 数码电子雷管和电磁雷管	(52)
4.3.1 电子雷管	(52)
4.3.2 电磁雷管	(53)
4.3.3 无起爆药雷管	(54)
4.4 电爆网路	(54)
4.4.1 电爆网路的设计和计算	(54)
4.4.2 电爆网路各组成部分的选择	(56)
4.4.3 串联准爆电流和准爆条件	(57)
4.4.4 电起爆法的特点及适用条件	(59)
4.5 非电起爆网路	(59)
4.5.1 导爆管起爆网路	(59)
4.5.2 导爆索起爆网路	(61)
4.5.3 导爆索和导爆管联合起爆网路	(63)
思考题	(63)
5 岩石爆破机理	(65)
5.1 岩石的动态特性及其分级	(65)

5.1.1 岩石的物理性质	(65)
5.1.2 岩石的动态特性	(66)
5.1.3 岩石坚固性与分级	(67)
5.1.4 岩石可爆性及分级	(68)
5.1.5 铁路隧道围岩分类方法	(69)
5.2 岩石中的爆炸应力波	(70)
5.2.1 爆炸应力波的基本概念	(70)
5.2.2 岩体内的冲击波	(72)
5.2.3 岩体内的爆炸应力波	(73)
5.2.4 岩体中的爆炸生成气体应力场	(76)
5.2.5 爆炸地震波	(77)
5.3 岩石爆破作用原理	(79)
5.3.1 单个药包爆破的内部作用	(79)
5.3.2 单个装药爆破的外部作用	(80)
5.4 岩石爆破破坏理论与爆破模型	(82)
5.4.1 岩石爆破破坏机理的假说	(82)
5.4.2 岩石爆破理论模型	(83)
5.4.3 岩石爆破损伤断裂过程和准则	(85)
5.5 爆破漏斗及利文斯顿爆破漏斗理论	(86)
5.5.1 爆破漏斗	(86)
5.5.2 利文斯顿爆破漏斗理论	(87)
5.6 装药量计算原理	(88)
5.6.1 体积公式	(89)
5.6.2 标准爆破漏斗的装药量计算	(89)
5.6.3 装药量的计算原理	(89)
5.7 影响爆破作用效果的因素	(90)
5.7.1 爆破条件和工艺对爆破作用的影响	(90)
5.7.2 炸药与岩石的匹配及对爆破作用的影响	(92)
思考题	(92)
6 隧道与地下工程掘进爆破技术	(94)
6.1 掏槽爆破	(94)
6.1.1 斜眼掏槽	(95)
6.1.2 直眼掏槽	(96)
6.1.3 混合掏槽	(98)
6.1.4 全断面深孔直眼掏槽爆破技术	(98)
6.2 掘进爆破设计与施工技术	(102)
6.2.1 掘进爆破参数	(102)
6.2.2 炮眼布置	(104)
6.2.3 装药结构和间隙效应	(105)
6.2.4 爆破说明书和爆破图表	(105)
6.2.5 隧道掘进爆破实例	(106)
6.3 风动凿岩机及其工具	(107)
6.3.1 凿岩机的分类	(107)
6.3.2 风动凿岩机	(108)

6.3.3 冲击式钻眼工具	(109)
6.4 光面爆破	(110)
6.4.1 光面爆破原理	(110)
6.4.2 光面爆破参数	(112)
6.4.3 光面爆破的施工和质量标准	(113)
6.4.4 影响光面爆破效果的因素	(115)
6.5 微差爆破	(116)
6.5.1 微差爆破的破岩机理	(116)
6.5.2 微差爆破间隔时间	(117)
6.5.3 微差爆破的安全性	(117)
6.6 定向断裂控制爆破	(118)
6.6.1 定向断裂爆破的种类	(118)
6.6.2 定向断裂爆破技术参数	(119)
6.7 掘进爆破技术的进展	(120)
6.7.1 遥控操作设备	(120)
6.7.2 钻眼过程	(120)
6.7.3 爆破过程	(121)
6.7.4 装岩过程	(121)
6.7.5 掘进工作面损伤评价	(121)
思考题	(122)
7 露天工程爆破技术	(123)
7.1 爆破工程地质	(123)
7.1.1 地形条件	(124)
7.1.2 地质条件	(124)
7.1.3 特殊地质条件	(125)
7.1.4 爆破作用引起的工程地质问题	(125)
7.2 露天台阶爆破技术	(126)
7.2.1 露天浅孔爆破	(126)
7.2.2 露天深孔台阶爆破	(127)
7.2.3 微差爆破技术	(130)
7.2.4 露天宽孔距小抵抗线爆破技术	(132)
7.3 露天台阶预裂爆破	(132)
7.3.1 预裂爆破机理	(132)
7.3.2 预裂爆破参数设计	(133)
7.3.3 预裂爆破效果的评价标准	(134)
7.4 深孔台阶爆破施工技术	(134)
7.4.1 深孔凿岩方法与机具	(134)
7.4.2 施工组织设计	(135)
7.5 露天硐室爆破	(138)
7.5.1 硐室爆破的分类及其适用条件	(138)
7.5.2 硐室爆破设计原则与设计内容	(138)
7.5.3 爆破参数的选择和设计计算	(142)
7.5.4 起爆系统	(145)
7.5.5 施工技术	(145)

思考题	(147)
8 拆除爆破与特种爆破技术	(148)
8.1 拆除爆破原理与设计	(148)
8.1.1 拆除爆破的基本原理	(148)
8.1.2 拆除爆破设计原理和设计方法	(149)
8.1.3 拆除爆破装药量计算	(149)
8.2 高耸构筑物拆除爆破	(151)
8.2.1 烟囱与水塔爆破拆除方案选择	(151)
8.2.2 爆破拆除技术设计	(152)
8.2.3 高耸构筑物的爆破施工安全措施	(154)
8.2.4 工程实例	(155)
8.3 建筑物拆除爆破	(156)
8.3.1 爆破拆除方案	(156)
8.3.2 钢筋混凝土框架结构倾倒或坍塌的条件	(157)
8.3.3 爆破技术设计	(157)
8.3.4 建筑物拆除爆破施工及安全技术	(159)
8.4 水压爆破	(159)
8.4.1 水压爆破原理	(159)
8.4.2 装药量计算	(160)
8.4.3 药包布置	(160)
8.4.4 水压爆破施工技术	(161)
8.5 水下爆破	(162)
8.5.1 水下爆破原理和水下冲击波基本理论	(162)
8.5.2 水下爆破类型	(163)
8.5.3 水下爆破设计与施工	(164)
8.6 聚能爆破及其应用	(165)
8.6.1 聚能原理	(165)
8.6.2 聚能爆破的应用	(165)
8.7 爆炸加工技术	(166)
8.7.1 金属爆炸加工	(166)
8.7.2 爆破压缩	(168)
思考题	(168)
9 爆破安全与测试技术	(169)
9.1 爆破飞石和有毒气体	(169)
9.1.1 爆破飞石	(169)
9.1.2 爆破有毒气体	(170)
9.2 爆破空气冲击波及噪声	(171)
9.2.1 爆破空气冲击波	(171)
9.2.2 爆破噪声与防护	(173)
9.3 爆破地震效应	(173)
9.3.1 爆破地震波	(173)
9.3.2 爆破地震的安全防护技术	(175)
9.4 爆破事故及其防治技术	(176)
9.4.1 早爆	(176)

9.4.2 拒爆的预防与处理	(177)
9.4.3 瞎炮及其处理	(179)
9.5 瓦斯和煤尘工作面的爆破安全技术	(180)
9.5.1 炸药爆炸引起瓦斯和煤尘爆炸的原因	(180)
9.5.2 瓦斯工作面的爆破安全技术	(181)
9.6 爆破测试技术	(181)
9.6.1 爆破测量内容与测试系统	(181)
9.6.2 爆破应力波与爆破地震波参数测量	(183)
9.6.3 爆破空气冲击波参数测量	(185)
9.6.4 高速摄影测量	(186)
9.6.5 测量数据处理与分析	(187)
思考题	(189)
参考文献	(190)

1 概 论

本章提要

本章主要介绍爆破理论与技术的现状与进展、爆破工程的特点及分类、爆破工程的安全性。本章的学习重点是工程爆破的基本特点、分类方法和应用领域,对地下工程爆破理论和技术有初步认识。

1.1 爆破工程的应用与发展

1.1.1 爆破器材及其发展

炸药的发明和应用,对人类社会的文明和发展起到了十分重要的作用,人们利用廉价的炸药能源代替繁重的体力劳动,创造了人类的物质财富,促进了社会进步。早在公元7世纪,我们的祖先就发明了火药,但是直到1627年,匈牙利人才开始使用黑火药进行矿山采掘爆破,那时还没有钻机,采用手工打眼,黑火药爆破。直到1863年,意大利人Sommineller发明了风动凿岩机,才开始使用风钻进行钻眼爆破。风钻的发明,使得爆破技术产生了划时代的飞跃,同时火药也开始做成药卷形式使用。1857—1870年,欧洲修建的长12233 m的仙尼斯铁路隧道,就是采用这种方法开挖的。

工业炸药作为一种威力大而价格便宜的能源,主要经历了两个大的变革,一是硝化甘油炸药和硝铵炸药的发明和使用;二是含水硝铵类炸药的诞生。两次变革都从实用上、安全上、经济上推动和促进了工程爆破技术的进步和发展,逐步形成了现代工程爆破技术。1867年瑞典人诺贝尔发明了以硅藻土为吸收剂的硝化甘油炸药,并发明了火雷管;同年,瑞典化学家德理森和诺尔宾首次成功研制了硝铵炸药,至此,工程爆破的安全性才上了新的台阶。到1870年,在欧洲修建长14912 m的圣哥达隧道时,使用了可钻直径为35~40 mm炮眼的风钻和含70%硝化甘油的炸药,此时,隧道钻爆技术开始进入现代工程爆破技术时代。20世纪以来,爆破器材和爆破技术又有了新的进展。1919年,出现了以泰安为药芯的导爆索;1927年,在瞬发电雷管的基础上研制成功秒延期电雷管;1946年,研制成功毫秒延期电雷管;20世纪50年代初期,铵油炸药得到了推广应用;1956年,库克发明了浆状炸药,解决了硝铵炸药的防水问题,随后发明了乳化炸药;20世纪80年代,研制和推广了导爆管起爆系统,同时,美国IRECO公司在世界上首次成功研发了露天现场混装乳化炸药技术,混装车运往爆破现场的只是原材料或半成品,只是在装填炮孔时才敏化成为爆破剂。20世纪90年代初,乳胶基质在40℃以下的化学敏化成药技术开发成功,可以在常温和低温下快速敏化成药,非爆炸性乳胶基质在炮孔内快速敏化成为乳化型爆破剂,从而成功研发了现场混装乳化炸药技术及其装药车,更适用于地下和露天爆破装药作业,使乳化炸药获得了更加广泛的应用。在完善和提高传统的电力起爆和非电起爆方法的同时,国外近年来开发的电子雷管是一种安全性好、延时时间可在0~8000 ms范围内按照1 ms量级进行编程设定、延时精确高的新型雷管,已在美国、加拿大、南非、澳大利亚和欧洲等国生产和使用。

我国在新中国成立初期,只有3个品种的铵梯炸药和秒延期雷管,1959年生产出抗水型铵梯炸药,1960年开始生产毫秒电雷管,1966年开始生产铵油炸药。1970年以后,在研制和引进的基础上开始生产浆状炸药、乳化炸药和水胶炸药,同时开发生产了非电导爆系统。目前,我国工业炸药的品种比较齐全,有胶质炸药、铵梯炸药、铵油炸药(包括改性铵油炸药、膨化硝铵炸药)、浆状炸药、水胶炸药、乳化炸药、液体炸药及工业耐热炸药等。1999年,我国开始了BCJ系列“散装乳化炸药装药车”的研制开发工作,并先后

研制成功了4种型号的中小直径乳化炸药现场混装车,填补了我国在这一技术领域的空白。我国的起爆材料在满足和保证工程爆破需要的同时,在品种、质量和精度上得到不断提高。目前已有适用于各种工程条件下的导火索、导爆索、瞬发雷管、毫秒延期电雷管、非电导爆雷管等不同规格的系列产品。国内也有电子雷管试制产品,其延时间隔为5 ms,有63个段别,今后它将在工程爆破中起到举足轻重的作用。

1.1.2 工程爆破技术及其应用

工程爆破是以工程建设为目的的爆破技术,它作为工程施工的一种手段,直接为国民经济建设服务,同时,工程爆破技术也是随着国民经济发展的需求而得到不断发展的。新中国成立初期,我国的工程爆破技术力量十分薄弱,施工设备简陋,爆破器材贫乏,全国仅有6个爆破器材生产厂,爆破技术人员更少得可怜,远不能满足经济建设的需要。经过60年来的不断创新、发展和壮大,已完全改变了落后的面貌。现在全国从事爆破科研、教学和施工人员超过100万,有工程爆破技术人员近3万人,每年工程爆破消耗炸药达120余万吨,工业雷管21亿余发。特别是改革开放30年来,我国的经济建设蓬勃发展,一大批新建项目包括铁路、高速公路、机场、港口码头、水利电力项目以及城市和厂矿改扩建工程相继开工,为工程爆破技术的发展和应用实践提供了广阔的舞台,现代爆破技术已深入应用到我国国民经济的各个领域并取得了喜人的成就。

工程爆破技术主要应用在以下几个方面:

- (1) 在采矿行业用以揭开矿石覆盖层,变地下采矿为露天开采的矿山井巷掘进爆破和矿石开采爆破。
- (2) 水利部门用以筑坝的定向爆破和打开水库引水隧道的岩塞爆破。
- (3) 铁路交通行业的隧道掘进爆破、路堑爆破、填筑路堤等爆破。
- (4) 石油化工行业用以埋设地下管道和过江管道以及处理油井卡钻事故的爆破(爆炸切割);还有水下炸礁、疏浚河道和为压实软土的水下码头、堤坝地基处理的水下爆破。
- (5) 机械冶金行业利用炸药的爆炸原理加工处理机械零部件;为表面硬化的金属淬火处理和不同材质的金属爆炸焊接;以及清除高炉、平炉和炼焦炉中的炉瘤或爆破金属炽热物的高温爆破法等新技术。

此外,在医学方面利用爆炸方法(几十毫克炸药)破碎膀胱结石的技术,也早已见报道。在工程爆破技术得到了长足发展的同时,理论研究及科研技术也取得了丰硕的成果,并在工程实践应用中解决了许多技术难题,取得了显著的经济效益和社会效益。

1.1.3 隧道与地下工程掘进爆破技术

我国是世界上铁路隧道最多、总长度最长的国家,铁路隧道的总长度已经超过3000 km,公路隧道、地铁隧道及地下巷道的修建长度也居于世界领先地位。在我国,地下工程的开挖方式还主要是采用爆破方式,爆破的效率直接影响着工程的进展和速度,爆破的效果直接影响着工程的质量和造价。1954年以前多用人工打眼,在无水地段的扩大和挖底部位使用黑火药,但其效率低、不安全,使用受到限制;1955年以后才采用硝化甘油炸药和二号岩石硝铵炸药,风钻打眼,进入到现代爆破技术时代。20世纪60年代中期,我国开始了光面爆破和预裂爆破的试验、应用和推广,到20世纪70年代已全面推广应用。

光面爆破和预裂爆破是一项合理利用炸药能量和有效控制爆破的技术,以其所具有的成型规整、保护围岩稳定性、超欠挖小、降低爆破震动影响、降低工程成本和加快施工进度等优越性,使爆破技术更加科学化、规范化。20世纪50年代瑞典首先进行了光面爆破技术的试验研究,随后美国、加拿大等国相继开展了预裂爆破技术的研究和应用。在光面爆破和预裂爆破成缝机理上,国内外也进行了大量的试验和理论研究工作,建立了裂缝启裂、发展、止裂的判据和理论,并对不耦合装药、切槽爆破、切缝药包爆破的控制断裂技术开展了试验研究和应用。在三峡工程的施工中,利用水平光面爆破进行基面保护层的开挖,实施水平光面爆破 3.2万 m^2 ,水平光爆残孔率达95%以上,不平整度小于15 cm,基岩原生裂隙无扩展现象,从而简化了工序、缩短了工期、提高了质量、降低了费用。

对于掘进爆破,掏槽的成功是关键。随着我国钻孔设备的改进,隧道与地下工程的爆破技术不断创新。20世纪80年代在双线铁路的大瑶山隧道和雷公尖隧道,采用大直径中空眼对称直眼掏槽,炮眼深度

达 5 m,实现了深孔全断面一次爆破开挖成型。在我国最长的秦岭隧道硬岩开挖爆破中,中心掏槽孔中采用 4 个不装药的大直径空孔等措施,在特硬岩隧道掘进的快速施工中创造了平均月进尺 264 m,最高月进尺 456 m 的纪录。位于海拔 5000 m 的世界最高隧道青藏铁路风火山隧道,在冻土爆破开挖技术方面,突破了钻孔、光面爆破和爆破器材方面的难题。在渝怀铁路的圆梁山隧道爆破中,采用减弱控制爆破等技术,解决了岩溶地层的爆破震动等问题。在号称“三峡第一洞”的三峡工程茅坪溪泄水隧洞工程施工中,钻爆法采用直径为 102 mm 的三空眼筒形掏槽和四空眼平行直眼掏槽的方法,炮眼深度达 4 m,平均每天进尺 9 m,创造了最高月进尺 223.4 m 的好成绩;隧洞进出口两个工作面贯通时的精度控制在 2 cm 以内,它们都标志着我国的隧道爆破技术进入到世界先进水平。

1.1.4 土石方露天爆破技术

土石方露天爆破技术主要有硐室爆破和深孔爆破。硐室爆破不需要很多大型机械设备,而且实施爆破的作业时间短、成本低,在铁路、公路、水利电力等重大工程建设中发挥了重要的作用。但由于硐室爆破对周围环境的影响比较大,随着大型钻孔和开挖设备的开发和利用,大量土石方开挖将逐步采用深孔爆破方法。新中国成立以来,装药量在千吨级的大爆破有 20 余次,甚至有突破万吨的土石方大爆破。利用定向爆破技术筑成的水利坝、矿尾坝、拦灰坝和交通路堤有近 60 座,其中千吨级的大坝有 2 座。20 世纪 80 年代以前,硐室爆破多采用集中药包的形式。后来通过对定向爆破作用机理的研究,条形药包的布置方案比集中药包优越,它可以改善岩石堆积形状,获得较均匀的破碎块度,并能减少对边坡的损坏和降低成本,所以,目前硐室爆破普遍采用平面药包和条形药包相结合的设计和施工方案。最典型的实例是在 1992 年 12 月珠海炮台山的 12000 t 炸药大爆破,它采用了多时段微差爆破技术,成功地一次爆破松动、抛掷了 1085 万 m^3 的石方。

深孔爆破由于有钻孔和装药设备的支持,使得在不同条件下能大大提高生产率,简化施工工艺和改善劳动条件,可以取得良好的效益。同时深孔爆破采用预裂或光面爆破法后更有利于保护边坡,特别是高边坡的稳定性,是一个具有发展前途的爆破方法。深孔爆破是目前矿山及大型土石方开挖的主要手段,目前深孔爆破技术有了重大的突破,大区微差爆破、临近边坡的控制爆破和大孔距、小抵抗线的大密集系数等爆破新技术,已广泛应用于生产实践。

1.1.5 拆除爆破技术

在城市改扩建过程中,建(构)筑物的拆除已成为全球建筑行业 and 爆破界的热门话题。建(构)筑物,尤其是高层建筑物的拆除,主要采用控制爆破技术。如 1995 年在武汉成功地拆除了正在缓慢倾斜的高 56 m 的 18 层大楼;1999 年上海成功拆除了高 67 m 的 16 层长征医院病房楼;2001 年成功实施了广州旧体育馆的爆破拆除工程,该工程在 3.5 s 内引爆了 8300 多个炸药包,使用了 10542 个非电雷管,总炸药量 525.6 kg,一次性爆破建筑面积超过 43000 m^2 、结构特殊的薄壳拱建筑;2001 年还完成了位于上海长宁区的 10 栋框架结构楼房的一次性爆破拆除任务。我国爆破拆除高度超过 100 m 的烟囱已有数十例,如 1995 年在广东茂名分别拆除了两座 120 m 的钢筋混凝土烟囱。目前,控制爆破正朝着“高、大、难、快”的方向发展,而且拆除对象的结构复杂化、材质多样化、环境复杂化,使得拆除工艺更加复杂。除控制爆破拆除法外,拆除方式也趋于多样化,还有重力锤冲击破坏拆除、推力臂拆除、机械牵引定向倒塌拆除、全机械化拆除、静态膨胀剂破碎等多种拆除方式。

1.2 爆破方法的特点及分类

工程爆破涉及的领域广阔、内容丰富、方法手段各异,且作业环境条件复杂,其基本特点可以归纳为以下几个方面:

① 工程爆破是一种高风险的涉及爆炸物品的特种行业。炸药和雷管等爆破器材是工程爆破作业中必不可少的物质保证,购买、运输、贮存、使用炸药等爆炸物品是爆破工作者必然经常涉及的事情。其次,

由于炸药爆炸是瞬时完成的,一项工程爆破通常是在几秒钟内完成且是不可重复的。因此,工程爆破是一种高风险的涉及爆炸物品的特种行业。

② 工程爆破外部环境特定且复杂。工程爆破都是在特定的条件下进行的,其外部环境复杂且要求严格。如城市建筑物拆除爆破通常是在闹市区和交通要道地区内进行的,且与保留建筑物毗邻或结构相互连接,又有市政铺设的各种管道和线路等。在这样复杂的环境条件下进行拆除爆破,就会对爆破设计、防护、环保、施工扰民等环节提出了更高、更难的要求。

③ 对爆破器材有特定的严格要求。尽管不同工程爆破使用的爆破器材品种会有所不同,但是对爆破器材的质量、性能等要求却是一致的。例如,大区微差爆破对雷管的准爆率和延时精度及炸药爆炸性能的可靠性等方面均有很高要求。

④ 工程爆破施工环节多而复杂。爆破工作者应首先熟悉被爆对象的工程地质、结构以及爆破要求,收集有关资料;然后再着手设计施工,如钻孔、装药、爆破网路的连接、起爆、警戒、振动监测等诸多环节,每一个环节都必须精确,以获得良好的爆破效果和确保安全。

工程爆破常用的分类方法主要有以下 3 种:

(1) 按药包形状分

① 集中药包法 当药包的最长边长不超过最短边长的 4 倍时,称为集中药包。集中药包起爆后产生的冲击波以均匀辐射状作用到周围的介质上。集中药包通常应用在硐室法爆破和药壶法爆破中。

② 延长药包法 当药包的最长边长大于最短边长或直径的 4 倍时,称为延长药包。延长药包起爆后,爆炸冲击波以柱面波的形式向四周传播并作用到周围的介质上。延长药包常常应用于深孔爆破、炮眼爆破和药室中的条形药包爆破中。

③ 平面药包法 当药包的直径大于其厚度的 3 倍或 4 倍时,称为平面药包。人们通常预先把炸药做成油毛毡或毛毯形状,应用时将其切割成块,包裹在介质表面。这种药包主要用于机械零件的爆炸加工。平面药包起爆后,大多数能量都散失到空气中,只是在与炸药接触的介质表面上受到爆炸作用,爆炸冲击波可以近似为平面波。

④ 异形药包法 为了某种特定的爆破作用,可以将炸药做成特定的形状。其中应用最广的是聚能爆破法,它是将装药的一端加工成圆锥形的凹穴或沟槽,使爆炸冲击波按其表面聚焦在它的焦点或轴线上,形成高能射流。这种药包可用来切割金属板材、大块岩体的二次破碎以及在冻土中穿孔等。

(2) 按装药方式与装药空间形状分

① 硐室法 又可分为集中装药硐室和条形装药硐室,这是土石方挖掘工程中的常用方法之一。该方法需要的施工机械比较简单,不受气候和地理条件的限制,工效高。

② 药壶法 即在普通炮孔底部,装入少量炸药进行不堵塞的爆破,使孔底部扩大成圆壶形,以装入较多药量的爆破方法。药壶法属于集中药包类,适用于中等硬度的岩石,能在工程量不大、钻孔机具不足条件下,以较少的炮孔爆破较多的土石方量。随着机械化施工水平的提高,药壶爆破的应用正逐步在减少。

③ 炮孔法 通常根据钻孔孔径和深度的不同,把孔深大于 4 m、孔径大于 50 mm 的爆破称为中深孔爆破,反之称为浅孔爆破或炮眼法爆破。从装药结构来看,这是属于延长药包一类,是工程爆破中应用最广、数量最大的一种爆破法。

④ 裸露药包法 直接将炸药敷设在被爆破物体表面上并加简单覆盖的爆破作业,这是一种最简单、最方便的爆破施工方法。这样的爆破法对于清除危险物、交通障碍物以及破碎大块岩石的二次爆破是简便而有效的。

(3) 按爆破技术分

① 定向爆破 使爆破后土石方碎块按预定的方向飞散、抛掷和堆积,或使被爆破的建筑物按设计方向倒塌和堆积的爆破。它的关键技术是要准确地控制爆破所要破坏的范围以及抛掷和堆积的方向与位置。

② 轮廓控制爆破 预裂爆破和光面爆破是常用的轮廓控制爆破技术,其目的都是为了在爆破后获得

平整的岩面,以保护围岩不受破坏。二者的不同在于预裂爆破是要在完整的岩体进行爆破开挖之前,施行预先的爆破,使沿着开挖部分和不需要开挖的部分的分界线裂开一道裂缝,用于隔断爆破作用对保留岩体的破坏,并在预裂爆破后形成新的平整岩面;光面爆破则是在主爆体爆破之后,利用密集钻孔和减弱装药进行的爆破,以求得到平整的坡面或轮廓面。

③ 微差爆破 微差爆破是在相邻炮孔或排孔间以及深孔内以毫秒级的时间间隔顺序起爆的一种起爆方法。由于相邻炮孔起爆的间隔时间很短,先爆孔为相邻的后爆孔增加了新的自由面,以及由于爆破应力波在岩体中的相互叠加作用和岩块之间的碰撞,使爆破的岩体破碎质量、爆堆成形质量好,可以降低炸药单耗和地震效应。

④ 特殊条件下的爆破技术 对于某种不常见的特殊情况,如森林灭火、抢堵洪水和泥石流、疏通河道、水下压缩淤泥地基等,用常规方法难以解决,或因时间紧迫以及工作条件恶劣而不能进行正常施工,这时需要采用新的爆破方案,认真进行设计计算和施工,以解决工程难题。

对于爆破工作者来说,掌握上述几种爆破方法并不困难,但要灵活运用这些方法去解决工程中的各种复杂问题,却有相当的难度。一个合格的爆破工程师,首先要熟悉各种介质的物理力学性质、爆破作用原理、爆破方法、起爆方法、爆破参数计算原理、施工工艺等方面的知识,同时还要掌握爆破时所产生的地震波、空气冲击波、飞石和破坏范围等爆破作用规律,以及相应的安全防护知识。

1.3 爆破工程的安全性

爆破工程作为一项科学技术的出现是随着社会生产实践发展起来的,而爆破安全问题一直是伴随着爆破技术的发展而突显的。爆破安全隐患一般有爆破地震、空气冲击波、噪声、飞石和有毒气体等。爆破安全还涉及炸药本身以及对其使用的安全性。炸药作为一种特殊的能源材料,在矿产资源开采和基础工程建设等方面发挥着不可替代的巨大作用,但炸药又是一种爆炸危险品,在其生产、储存、运输和使用各环节中都存在安全问题,炸药库的恶性爆炸事故频繁发生,伤亡事故严重,所以炸药的安全问题正受到各国政府越来越多的关注,社会公众要求减少爆炸物品的呼声也越来越高。

为此,我国制定了一系列有关爆破工程的条例和国家标准,主要有:

- (1)《中华人民共和国民用爆炸物品管理条例》(国务院 1984 年 1 月 6 日发布);
- (2)《爆破安全规程》(GB 6722—86),2003 年修订为 GB 6722—2003;
- (3)《大爆破安全规程》(GB 13349—92);
- (4)《拆除爆破安全规程》(GB 13533—92)。

上述爆破行政条例和技术法规是每一位爆破作业者必须掌握和遵守的法规。这些规定都是从成千上万例事故的血的教训中总结出来的,每个爆破作业人员都必须严格遵守。

以上法规中对爆破工程的爆破作业人员的素质也有较高的要求。所有爆破作业人员都应参加安全技术培训和考核,每个爆破人员都应明确自己的职责和权限。在《爆破安全规程》中,把爆破作业人员分为:爆破工作领导人、爆破工程技术人员、爆破段(班)长、爆破员、爆破器材库主任、爆破器材保管员和爆破器材试验员。根据《爆破安全规程》的规定,进行爆破工作的企业必须设有爆破工程领导人、爆破工程技术人员、爆破段(班)长、爆破器材库主任。爆破工程还有着严格的规章制度,对炸药和雷管的使用、运输、保管及施工每一个步骤都有着严格的规定。

爆破工程的目的是在破坏中求建设,是为了特定的工程项目而进行的。一次成功的爆破,首先必须是安全的,爆破的结果必须满足该工程的设计要求,同时还必须保证其周围的人和物的安全。这就意味着爆破工程技术人员除了应用一般的爆破方法去进行爆破施工外,还必须掌握一定的技术手段才能达到安全、高效的目的。

2 炸药的爆炸性能及其参数

本章提要

本章主要介绍爆炸和炸药的基本理论,内容包括爆炸及炸药的基本概念、炸药的爆炸反应及其热化学参数、炸药的起爆与感度、炸药的爆轰理论、炸药的爆炸作用及其性能指标等。本章学习的要点是炸药爆炸的基本理论。需要重点掌握的内容有:炸药的爆炸反应及其参数、炸药的感度和安全性,波的基本概念、冲击波、爆轰波及其参数计算,炸药的爆破作用及其性能指标的测定。

2.1 炸药及爆炸的基本概念

2.1.1 爆炸及其分类

概括地说,爆炸是某一物质系统在发生迅速的物理和化学的变化时,系统本身能量借助气体的急剧膨胀而转化为对周围介质做机械功,同时伴随有强烈放热、发光和声响等效应。爆炸现象大致可以归纳为三大类:

(1) 物理爆炸。经验表明,自行车轮胎由于打气过多,内部压力过大,超过了内胎的强度,使内胎突然破裂,以致发出大的响声。这种仅仅是物质形态发生变化,而化学成分和性质没有改变的爆炸现象,叫做物理爆炸。

(2) 核爆炸。由于核裂变(如 U^{235} 的裂变)或核聚变(氘、氚、锂的聚变)反应放出巨大能量,使裂变或聚变产物形成高温高压的蒸气而迅速膨胀做功,造成巨大的破坏作用。这种由核裂变或核聚变释放出巨大能量所引起的爆炸现象,叫做核爆炸。

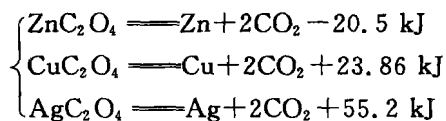
(3) 化学爆炸。燃放鞭炮所引起的强烈响声或爆破所引起的岩石破裂、位移和气浪等,都是由于炸药获得一定的起爆能量后迅速发生化学反应,放出足够的热能,形成高温高压气体,并对外界膨胀做功的缘故。这种爆炸现象叫做化学爆炸,化学爆炸不仅是物质的形态发生了变比,而且成分和性质也发生了变化。

在工程爆破中,应用最广泛的是化学爆炸,而且主要是利用其破坏作用。

2.1.2 产生化学爆炸的条件

实践表明,形成化学爆炸必须同时具备四个条件,即变化过程应是放热的、高速进行的、生成大量的气体产物和能自动迅速地进行传播。下面简要讨论一下这些条件。

(1) 爆炸变化过程放出大量的热是产生化学爆炸的首要条件。热是爆炸做功的能源。同时,如果没有足够的热量放出,化学变化本身不能供给继续变化所需要的能量,化学变化就不可能自行传播,爆炸过程也就不能产生。例如:



这三个分解反应,虽然都生成气体,反应也很迅速,但前一个分解反应是吸热的,反应过程很平静,显然不是爆炸反应。第二个反应虽属放热反应,但反应热很小,仍不足以使反应自动传播,因此,也不是爆炸反应。唯有第三个分解反应在分解时能够放出大量的热,使反应得以迅速进行并稳定传播。无疑,这样的

分解变化过程就具有化学爆炸的特征。

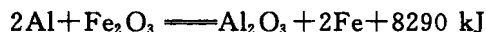
(2) 变化过程必须是高速的,只有高速的化学反应,才能忽略能量转换过程中热传导和热辐射的损失,在极短的时间内将反应形成的大量气体产物加热到数千度、压力猛增到几万乃至几十万个大气压,高温高压气体迅速向四周膨胀做功,即产生了爆炸现象。

从能量的观点来看,和一般的可燃物相比,炸药并非是高能物质,表 2.1 列举的反应热清楚地说明了这一点。然而,一般可燃物(如煤)的燃烧过程进行十分缓慢,反应放出的热量大部分由于热传导和热辐射而损失掉了,不能将产物加热到很高的温度,更不能形成很高的压力,所以不能形成爆炸。相反,炸药的爆炸反应通常是在数十万分之一秒甚至数百万万分之一秒内完成的。例如,1 kg 球状梯恩梯药包完全爆炸的时间仅为十万分之一秒左右。在如此短暂的时间内,反应释放出的能量来不及散失而高度集中于有限的空间内,因而爆炸反应达到很高的能量密度,这也是形成化学爆炸的重要条件。

表 2.1 一些物质的反应热

物质名称	反应形式	释放的能量	
		kJ/kg	kJ/L
煤(C)	与氧按化合量燃烧	8960	17.16
氢(H ₂)	与氧按化合量燃烧	13524	4.18
硝化甘油	爆炸反应	6217	9965
硝化棉	爆炸反应	4291	5581
梯恩梯	爆炸反应	4187	6808
黑火药	爆炸反应	2784	3341
硝酸炸药	爆炸反应	4228	7117
雷汞	爆炸反应	1733	6067
叠氮化铅	爆炸反应	1536	4760

(3) 变化过程应能生成大量的气体产物,这也是产生化学爆炸不可缺少的因素之一。炸药爆炸时所生成的气体产物是做功的物质。气体具有很大的可压缩性和膨胀系数,在爆炸的瞬间处于强烈的压缩状态,形成很高的势能。该势能在气体膨胀过程中,迅速转变为机械功。如果反应产物不是气体而是固体或液体,那么,即使是放热反应,也不会形成爆炸现象。例如,铝和氧化铁的反应,即铝热剂反应:



反应放出的热很高,可使生成物加热到 3000 ℃左右,但由于反应中没有大量气体生成,因而不是爆炸反应。

(4) 变化过程能自动进行传播。从上述分析可知,在外界能量激发下,化学爆炸可放出大量的热,致使炸药中某一局部发生化学反应后,其余部分则无需任何其他外界因素就能自动地连续不断地传播下去。

上述四点是产生化学爆炸的四个条件,也是化学爆炸不同于一般化学反应的四个重要特点。还应看到,上述四个条件是相辅相成的、缺一不可,只有它们的综合效果才能使化学反应变化过程具有爆炸的性质。

炸药是最常见的一种化学爆炸,根据以上爆炸条件给出炸药的定义为:炸药是在一定条件下,能够发生快速化学反应,放出能量,生成气体产物,并显示爆炸效应的化合物或混合物。就化学组成而言,除少数起爆药外,炸药都是由两部分物质组成,即氧化剂和燃料。在化合物炸药中,氧化剂是分子中含氧的基团;燃料则是分子中含碳、氢的基团,这两种基团都是反应性很强的活性原子基团,但在分子中被活性小的中性原子基团或原子(通常为氮原子)所隔离。在混合炸药中,氧化剂是含氧的非爆炸性的氧化剂分子或富有氧元素的炸药分子,燃料则是非爆炸性可燃剂分子或富有碳、氢分子的炸药分子。因此,从炸药组成元素来看,它主要由碳、氢、氮、氧四种元素组成。